



TUGAS AKHIR - RE 141581

PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI MENGUNAKAN ANODA *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) DENGAN PENAMBAHAN ION KLORIDA DAN SULFAT

FATMAWATI AGUSTINA
0321144000086

Dosen Pembimbing
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - RE 141581

**PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI
MENGUNAKAN ANODA *BORON-DOPED
DIAMOND* (BDD) DENGAN PENAMBAHAN ION
KLORIDA DAN SULFAT**

FATMAWATI AGUSTINA
03211440000086

Dosen Pembimbing
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - RE 141581

ELECTROCHEMICAL OXIDATION PROCESS OF LANDFILL LEACHATE USING BORON-DOPED DIAMOND ANODES WITH CHLORIDE AND SULFATE ION ADDITION

FATMAWATI AGUSTINA
03211440000086

Supervisor
Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phill., Ph.D.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

LEMBAR PENGESAHAN

PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI MENGUNAKAN ANODA *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) DENGAN PENAMBAHAN ION KLORIDA DAN SULFAT

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada

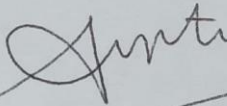
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan ITS
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FATMAWATI AGUSTINA

NRP. 03211440000086

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D

NIP. 19820804 200501 1 001



PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI MENGUNAKAN ANODA *BORON-DOPED DIAMOND* (BDD) DENGAN PENAMBAHAN ION KLOORIDA DAN SULFAT

Nama Mahasiswa : Fatmawati Agustina
NRP : 03211440000086
Departemen : Teknik Lingkungan ITS
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,
M.Phill., Ph.D.

ABSTRAK

Oksidasi elektrokimia merupakan pengolahan fisik-kimia yang efektif untuk menyisihkan polutan organik dan ammonia pada lindi. Faktor-faktor yang berpengaruh pada proses ini antara lain jenis elektroda, pH awal proses dan penambahan elektrolit. Anoda *Boron-Doped Diamond* memiliki potensi oksidasi yang sangat tinggi. Anoda ini dapat mengaktivasi ion-ion di dalam lindi menjadi senyawa radikal seperti: klorida (Cl^\cdot , Cl_2^\cdot), karbonat (CO_3^\cdot), fosfat ($\text{H}_2\text{PO}_4^\cdot$, $\text{PO}_4^{2-\cdot}$) dan sulfat (SO_4^\cdot) yang dapat meningkatkan laju oksidasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh pH awal proses serta pengaruh penambahan ion Cl^- dan SO_4^{2-} terhadap efisiensi proses oksidasi elektrokimia pada lindi menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond*. Efisiensi dari proses ini dinilai berdasarkan tingkat penyisihan COD, ammonium dan konsumsi energi spesifik.

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokimia yang terbuat dari akrilik dengan volume efektif 80 mL. Elektroda yang digunakan adalah anoda *boron-doped diamond* dan katoda *silver* dengan luas masing-masing 2 cm x 4 cm dan jarak antar elektroda 20 mm. Total lindi yang diolah adalah 1 L dengan sistem *batch recirculation* selama 7 jam dengan debit aliran 2 mL/detik. Variasi pH awal proses yang digunakan adalah pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Variasi penambahan elektrolit adalah penambahan NaCl, Na_2SO_4 , dan NaCl+ Na_2SO_4 . Variasi pH awal

proses adalah pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Parameter yang dianalisis meliputi COD, Cl^- , SO_4^{2-} , Ammonium, pH dan TDS, BOD_5 , TOC dan total klorin.

Hasil menunjukkan bahwa proses penyisihan COD dan ammonium paling tinggi dicapai pada saat penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4 pada pH asli lindi, yaitu 0,7291 g COD ($0,0208 \text{ g Wh}^{-1}$) dan 0,215 g Ammonium ($0,006 \text{ g Wh}^{-1} \text{ NH}_4^+$).

Kata Kunci: Oksidasi elektrokimia, lindi, boron-doped diamond, ion klorida, ion sulfat

ELECTROCHEMICAL OXIDATION PROCESS OF LANDFILL LEACHATE USING BORON-DOPED DIAMOND ANODES WITH CHLORIDE AND SULFATE ION ADDITION

Name : Fatmawati Agustina
Register Number : 03211440000086
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T.,
M.Phill., Ph.D.

ABSTRACT

Electrochemical oxidation is one of effective physico-chemical methods applied to remove organic pollutant and ammonia in landfill leachate wastewater. The efficiency of electrooxidation depends on various parameters such as current density, pH, chloride concentration, type and concentration of electrolyte used during the process. Boron-Doped Diamond is characterised as one of high potential oxidation anodes. Recent studies indicate that BDDs are capable of generating radical species such as chloride (Cl^\bullet , $\text{Cl}_2^{\bullet-}$), carbonate ($\text{CO}_3^{\bullet-}$), phosphate ($\text{H}_2\text{PO}_4^\bullet$, $\text{PO}_4^{\bullet-2}$) and sulfate ($\text{SO}_4^{\bullet-}$) which can increase the oxidation rates of organic pollutants. The present study evaluated the influence of pH operation and the difference role of sulfate and chloride ion in electrochemical oxidation process using BDD anode.

A laboratory-scale electrochemical reactor was design with effective volume 80 mL. Boron-Doped Diamond was used as anode and silver was used as cathode with each surface area of 8 cm^2 and electrode gap of 20 mm. 1 L landfill leachate was pumped into reactor and recirculated for 7 hours at a flow rate of 2 mL s^{-1} . The constant applied current density during electrochemical process was 75 mA cm^{-2} . The variation of electrolyte addition in this study was 0.05 M NaCl; 0.05 M Na_2SO_4 , and 0.025 M NaCl+ 0.025 M Na_2SO_4 . pH varied as unadjusted, adjusted to 3 and 5 in the beginning of each variation. Main parameters analyzed were

including COD, Cl^- , SO_4^{2-} , Ammonium, pH, TDS, BOD_5 , TOC and Total Chlorine.

The results show the best removal efficiency of COD and ammonia were obtained with addition of 0,025 M NaCl+0,025 M at pH 8,5 (original pH of leachate), that was 0,7291 g COD (0,0208 g Wh^{-1}) and 0,215 g Ammonium (0,006 g $\text{Wh}^{-1} \text{NH}_4^+$).

Keywords: Electrochemical Oxidation, leachate, boron-doped diamond anode, chloride ion, sulfate ion

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Proses Oksidasi Elektrokimia pada Lindi menggunakan Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dengan Penambahan Ion Klorida dan Sulfat”. Atas arahan dan bimbingan yang telah diberikan hingga terselesaikannya tugas akhir ini, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, S.T.,MT.,M.Phill.,Ph.D. selaku dosen pembimbing dan Ibu Ervin Nurhayati, S.T.,M.T.,M.Phill.,Ph.D. selaku dosen co-pembimbing tugas akhir, terimakasih atas arahan, bimbingan, ilmu, kesabaran dan motivasi yang telah diberikan selama ini.
2. Ibu Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum, M.App.Sc., Ibu Dr. Ir. Ellina Sitepu Pandebesie, S.T., dan Bapak Dr. Ir. Irwan Bagyo S., M.T. selaku dosen pengarah, terimakasih atas arahan, kritik dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Hadi Sutrisno, Bapak Ashari dan Ibu lin selaku laboran yang senantiasa membantu selama di Laboratorium.
4. Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Gresik atas izin dan bantuan selama pengambilan sampel lindi di TPA Ngipik.
5. Orang tua, saudara dan keluarga besar penulis atas segala dukungan do'a dan materi yang telah diberikan hingga kini.
6. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITS atas dana hibah penelitian yang telah diberikan dan Pemerintah Kabupaten Paser atas beasiswa selama menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan ITS.
7. Teman-teman angkatan 2014 Teknik Lingkungan ITS atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan selama ini.

Penulis menyadari ada banyak kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun sehingga penulis dapat menjadi lebih baik. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Lindi	5
2.1.1 Karakteristik Lindi	5
2.1.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia	6
2.1.3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik	6
2.1.4 Karakteristik Lindi di Indonesia	7
2.1.5 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan	8
2.2 Alternatif Pengolahan Lindi	8
2.2.1 Pengolahan Biologis	8
2.2.2 Pengolahan Fisik-Kimia	8
2.3 Oksidasi Elektrokimia	11
2.4 Mekanisme Proses Oksidasi Elektrokimia Senyawa Organik dan Ammonia	15
2.4.1 Oksidasi Langsung	15
2.4.2 Oksidasi Tidak Langsung	16

2.4.3 Mekanisme Penyisihan Ammonia	18
2.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Oksidasi Elektrokimia	18
2.5.1 Kerapatan Arus.....	18
2.5.2 pH	19
2.5.3 Konfigurasi Reaktor (Membrane-devided Cell dan Undivided Cell)	20
2.5.4 Debit Aliran	21
2.5.5 Jenis Elektroda	21
2.5.6 Konsentrasi Ion Klorida.....	24
2.6 Anoda Boron-Doped Diamond (BDD)	25
2.7 Perhitungan Efisiensi Proses.....	27
2.7.1 Hukum Coulomb	27
2.7.2 Konsumsi energi spesifik.....	27
2.7.3 <i>Instantaneous Current Efficiency</i> (ICE)	28
2.8 Penelitian Terdahulu	28
BAB 3 METODE PENELITIAN	31
3.1 Deskripsi Umum	31
3.2 Kerangka Penelitian.....	31
3.2.1 Ide Penelitian	31
3.2.2 Studi Literatur	33
3.2.3 Penentuan variabel dan parameter	34
3.2.4 Persiapan Penelitian.....	36
3.2.5 Penelitian Pendahuluan.....	39
3.2.6 Penelitian Utama	40
3.2.7 Analisis dan Pembahasan	41
3.2.8 Kesimpulan dan Saran	41
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Penelitian Pendahuluan.....	43

4.1.1 Karakteristik Awal Lindi	43
4.1.2 Penentuan Kerapatan Arus Optimum dan Waktu Operasi	44
4.2 Penelitian Utama	48
4.2.1 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektrooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl	49
4.2.2 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektrooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	57
4.2.3 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektrooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄	64
4.3 Perubahan Biodegradabilitas Lindi (BOD ₅ /COD)	71
4.4 Mineralisasi Zat Organik Selama Proses Elektrooksidasi	73
4.5 Konsumsi Energi Spesifik Proses Elektrooksidasi	75
4.6 Laju Penyisihan COD dan Ammonium	78
4.7 <i>Instantaneous Current Efficiency</i> (ICE)	79
4.8 Aplikasi Proses Elektrooksidasi pada Pengolahan Lindi	80
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN A PERHITUNGAN KEKUATAN IONIK	97
LAMPIRAN B PROSEDUR ANALISIS	99
LAMPIRAN C DATA HASIL ANALISIS	109
Lampiran D DOKUMENTASI PENELITIAN	121
BIOGRAFI PENULIS	125

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Diagram proses elektrolisis	12
Gambar 2. 2 Proses Oksidasi Langsung dan Oksidasi Tidak Langsung	15
Gambar 2. 3 Persenyawaan Klorin Berdasarkan Nilai pH	25
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	33
Gambar 3. 2 Reaktor Elektrokimia	37
Gambar 4. 1 Penurunan COD [COD/COD ₀] selama proses elektooksidasi	45
Gambar 4. 2 Penyisihan Warna Asli Lindi	46
Gambar 4. 3 pH dan Penyisihan Massa TDS	47
Gambar 4. 4 Penurunan TDS pada Variasi Penambahan 0,05 M NaCl	50
Gambar 4. 5 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	52
Gambar 4. 6 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	52
Gambar 4. 7 Penurunan nilai COD pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl	53
Gambar 4. 8 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	55
Gambar 4. 9 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	55
Gambar 4. 10 Penurunan nilai Ammonium Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl	56
Gambar 4. 11 Penyisihan Massa TDS dan Massa Klorida pada Variasi Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	58
Gambar 4. 12 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	59
Gambar 4. 13 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	60
Gambar 4. 14 Massa COD pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	60
Gambar 4. 15 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	62

Gambar 4. 16 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4	63
Gambar 4. 17 Penurunan Nilai Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4	63
Gambar 4. 18 Penurunan Massa TDS pada Variasi Penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	65
Gambar 4. 19 Penurunan Nilai COD pada pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	66
Gambar 4. 20 Penurunan Nilai COD pada pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	67
Gambar 4. 21 Penurunan Nilai COD pada pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	67
Gambar 4. 22 Penurunan Nilai Ammonium pada pH 3 dengan penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	69
Gambar 4. 23 Penurunan Nilai Ammonium pada pH 5 dengan penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	69
Gambar 4. 24 Penurunan Nilai Ammonium pada pH Asli Lindi dengan penambahan 0,025 M NaCl +0,025 M Na_2SO_4	70
Gambar LD. 1 Pengambilan dan Penyaringan Sampel	121
Gambar LD. 2 Operasi Reaktor Elektrokimia	121
Gambar LD. 3 Sampel Sebelum dan Setelah Pengolahan	122
Gambar LD. 4 Analisis Parameter.....	122

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi lindi berdasarkan umur landfill	5
Tabel 2. 2 Baku Mutu Lindi di Indonesia	6
Tabel 2. 3 Karakteristik TPA Ngipik, Gresik	6
Tabel 2. 4 Karakteristik Lindi di Indonesia.....	7
Tabel 2. 5 Efektivitas Proses Koagulasi-Flokulasi dalam Pengolahan Lindi	9
Tabel 2. 6 Efektivitas proses <i>Ammonium Stripping</i> pada Pengolahan Lindi	10
Tabel 2. 7 efektivitas Pengolahan Lindi dengan Proses Adsorbsi	11
Tabel 2. 8 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi dengan Proses Fisik-Kimia.....	13
Tabel 2. 9 Kekuatan Oksidasi Beberapa Jenis Anoda yang digunakan pada Mineralisasi Elektrokimia pada Media Asam	23
Tabel 2. 10 Perbandingan Kinerja Elektroda pada Proses Elektrooksidasi	23
Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter	35
Tabel 3. 2 Matriks Variasi Bahan uji Penelitian	40
Tabel 4. 1 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik	43
Tabel 4. 2 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	71
Tabel 4. 3 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl	71
Tabel 4. 4 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,05 M NaCl	72
Tabel 4. 5 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	72
Tabel 4. 6 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	72
Tabel 4. 7 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,05 M Na ₂ SO ₄	72
Tabel 4. 8 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄	72

Tabel 4. 9 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄	73
Tabel 4. 10 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄	73
Tabel 4. 11 Perubahan nilai TOC	74
Tabel 4. 12 Konsumsi Energi Spesifik parameter COD	76
Tabel 4. 13 Konsumsi Energi Spesifik Parameter Ammonium.....	77
Tabel 4. 14 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan NaCl	78
Tabel 4. 15 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan Na ₂ SO ₄	78
Tabel 4. 16 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan NaCl+Na ₂ SO ₄	79
Tabel 4. 17 ICE COD dan Cl ₂ setelah 7 jam proses elektooksidasi	80
Tabel 4. 18 Analisis Kebutuhan Bahan Kimia	83
Tabel 4. 19 Harga Bahan Kimia	84
Tabel 4. 20 Kebutuhan Biaya per Liter Lindi	84

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah merupakan efluen kompleks yang mengandung senyawa organik, logam berat, amonia, khlorida, serta senyawa *refractory* (senyawa yang sulit terurai) dan senyawa toksik lainnya (Zhou *et al.*, 2016a). Komposisi dan konsentrasi dari polutan yang terkandung di dalam lindi dipengaruhi oleh tipe sampah dan umur landfill (Cabeza *et al.*, 2007). Apabila tidak dikelola dengan baik, lindi dari TPA berpotensi sebagai sumber pencemaran air tanah dan air permukaan (Tatsi *et al.*, 2003).

Lindi dari TPA biasanya mengandung BOD dan COD dalam konsentrasi yang tinggi serta rasio BOD dan COD yang tinggi pula ($BOD/COD > 0,5$). Kemampuan biodegradasi yang tinggi ini menjadikan pengolahan biologis menjadi alternatif pertama untuk pengolahan lindi, khususnya di Indonesia. Sun *et al.* (dalam Quan *et al.* 2003) menjelaskan bahwa pengolahan biologis ini tidak sepenuhnya efisien untuk mendegradasi senyawa *refractory* ataupun dalam menghilangkan zat warna yang terkandung dalam lindi. Pengolahan biologis sangat efektif untuk mengolah lindi yang dihasilkan dari landfill yang umurnya relatif lebih muda (1-2 tahun), yang kandungan utamanya adalah *volatile fatty acid*, namun kurang efektif untuk mengolah lindi yang umurnya relatif lebih tua (Amokrane *et al.*, 1997). Lindi tua atau lindi terstabilisasi dicirikan dengan tingkat biodegradabilitas yang rendah (nilai $BOD/COD < 0,5$), sehingga sulit untuk diolah secara biologis. Kandungan ammonium yang tinggi juga dapat menjadi inhibitor bagi mikroorganisme pada proses pengolahan biologis (Tatsi *et al.*, 2003). Oleh karena itu, diharapkan adanya alternatif lain sebagai pendukung untuk meningkatkan efisiensi pengolahan lindi.

Pengolahan fisik-kimia telah teruji mampu untuk menghilangkan senyawa *refractory* dari lindi yang terstabilisasi. Pengolahan fisik-kimia yang telah banyak diteliti untuk mengolah lindi yang terstabilisasi antara lain: koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, *ammonium stripping*, filtrasi menggunakan membran, adsorpsi, *ion*

exchange, dan elektrokimia (Kurniawan *et al.*, 2006). Menurut Ozturk *et al.* (2003), penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ menggunakan proses presipitasi kimia dengan konsentrasi awal 4024 mg/L dan 2240 mg/L dapat mencapai 50% dan 90%. Namun, proses presipitasi kimia ini membutuhkan dosis presipitan yang besar, sensitif terhadap pH, dan menghasilkan lumpur yang perlu pengolahan lebih lanjut.

Belakangan ini, pengolahan lindi dengan proses oksidasi elektrokimia atau sering disebut elektrooksidasi semakin berkembang. Proses elektrooksidasi dapat menghilangkan zat warna, menurunkan kandungan organik, serta meningkatkan kemampuan biodegradasi pada lindi (Fernandes *et al.*, 2014). Proses elektrooksidasi juga efektif untuk menghancurkan polutan, terutama senyawa *refractory*, dan mampu menghilangkan senyawa organik dan ammonia dengan efisiensi penyisihan yang tinggi (Cabeza *et al.*, 2007). Selain itu, proses elektrooksidasi juga ramah lingkungan, membutuhkan sedikit atau bahkan tidak membutuhkan tambahan bahan kimia, menggunakan peralatan yang sederhana dan mudah dioperasikan (Anglada *et al.*, 2009). Kadar klorida yang tinggi pada lindi juga menjadi keuntungan pada proses ini, karena dapat memperkecil hambatan listrik, sehingga energi listrik yang dibutuhkan akan semakin kecil (Bagastyo *et al.*, 2014). Efisiensi dari proses elektrooksidasi dapat dipengaruhi oleh jenis elektroda yang digunakan, pH, kuat arus listrik, penambahan *active species*, serta jarak antar elektroda. Mussa *et al.* (2013) melakukan penelitian tentang dekolonisasi lindi dengan anoda grafit dan hasilnya yaitu penyisihan warna 80%, penyisihan COD 72% dan penyisihan ammonia sebesar 45%. Pengolahan lindi dengan metode elektrooksidasi ini juga pernah dilakukan oleh Abdullah (2015) dalam tugas akhirnya. Dalam penelitiannya, Abdullah (2015) menggunakan *stainless steel* sebagai anoda dan tembaga sebagai katoda. Dengan nilai COD awal lindi 2.462 mg/L, kondisi optimum didapatkan tegangan yang digunakan 3 V dan penambahan NaCl 2 g/L yaitu penyisihan COD sebesar 80,9%.

Anoda yang umumnya digunakan dalam proses oksidasi antara lain: $\text{TiO}_2/\text{RuO}_2$, $\text{PbO}_2/\text{SnO}_2$, Ti/Pt, SPR PbO_2/Ti , dan p-Si/BDD. Dari berbagai anoda tersebut, *Boron-Doped Diamond* (BDD)

diketahui memiliki potensi oksidasi yang sangat tinggi, yaitu 2,2-2,6 V (Comninellis *et al.*, 2008). Berdasarkan Cabeza *et al.* (2007), pengolahan lindi dengan proses elektrok oksidasi menggunakan anoda BDD dapat mencapai penyisihan COD hampir 100% dalam waktu operasi 6-8 jam (nilai COD dalam lindi yang digunakan sebagai bahan uji adalah 4430 mg/L dan 1130 mg/L).

Anoda BDD dapat mengaktivasi ion-ion di dalam lindi membentuk senyawa radikal seperti: klorida (Cl^\cdot , Cl_2^\cdot), karbonat (CO_3^\cdot), fosfat ($\text{H}_2\text{PO}_4^\cdot$, $\text{PO}_4^{2-\cdot}$) dan sulfat (SO_4^\cdot) yang dapat meningkatkan laju oksidasi (Farhat *et al.*, 2017). Namun, sejauh ini belum ditemukan studi mengenai perbandingan penambahan spesies tersebut terhadap efisiensi penyisihan polutan organik (terukur sebagai COD) dan ammonium pada lindi. Sehingga, dalam penelitian ini dianalisis bagaimana pengaruh penambahan ion Cl^- dan SO_4^{2-} terhadap efisiensi proses elektrok oksidasi pada lindi menggunakan anoda BDD. Proses elektrok oksidasi dengan menggunakan anoda BDD ini diharapkan dapat secara efektif menurunkan polutan organik dan ammonium yang terkandung dalam lindi. Katoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah *silver* karena sifatnya yang inert. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif dalam pengolahan lindi agar dapat memenuhi baku mutu efluen yang telah ditetapkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian antara lain:

1. Bagaimana pengaruh penambahan ion Cl^- dan SO_4^{2-} terhadap efisiensi proses oksidasi elektrokimia pada pengolahan lindi dengan menggunakan anoda BDD?
2. Bagaimana pengaruh pH terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan ammonium pada lindi?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis pengaruh penambahan ion Cl^- dan SO_4^{2-} terhadap efisiensi proses oksidasi elektrokimia pada pengolahan lindi dengan menggunakan anoda BDD?
2. Menganalisis pengaruh pH terhadap efisiensi penyisihan polutan organik dan ammonium pada lindi?

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini antara lain:

1. Lindi yang digunakan adalah lindi dari TPA Ngipik, Gresik.
2. Penelitian ini menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dan katoda *silver*.
3. Variabel dalam penelitian ini adalah pH dan penambahan ion Cl^- dan SO_4^{2-} .
4. Parameter yang diukur adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), Cl^- , SO_4^{2-} , Ammonium, pH, *Total Dissolved Solid* (TDS), *Biochemical Oxygen Demand* (BOD_5), Total Organic Carbon (TOC) dan Total Klorin.
5. Pembuatan reaktor penelitian dilakukan dalam skala laboratorium.
6. Reaktor yang digunakan adalah reaktor satu kompartemen (*undivided cell*) dengan sistem *batch recirculation*.

1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini antara lain:

1. Sebagai informasi mengenai efektifitas proses oksidasi elektrokimia dengan menggunakan anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) dalam pengolahan lindi.
2. Sebagai informasi mengenai alternatif pengolahan lindi di TPA Ngipik maupun di Indonesia.
3. Memberikan informasi ilmiah mengenai pengaruh penambahan elektrolit yang mengandung Cl^- dan SO_4^{2-} terhadap efektifitas BDD dalam menurunkan polutan organik dan ammonia pada lindi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lindi

Lindi merupakan limbah cair dari proses perkolasi air hujan melewati lapisan landfill sampah kota hingga terbentuk senyawa yang sangat kompleks (Fernandes *et al.*, 2015). Lindi merupakan cairan yang merembes melalui sampah landfill dan menyerap unsur kimia dan biologi dari sampah. Cairan yang masuk ke dalam landfill berasal dari air hujan, air tanah, drainase dan cairan dari proses dekomposisi sampah. Lindi berwarna cokelat dengan bau yang sangat menyengat, serta mengandung kadar organik dan anorganik yang tinggi (Peng, 2017).

2.1.1 Karakteristik Lindi

Polutan yang terkandung dalam lindi dapat dibedakan menjadi empat jenis, yaitu: senyawa organik terlarut, senyawa anorganik, logam berat dan *Xenobiotic Organic Compound (XOCs)*. Senyawa organik terlarut dan ammonia nitrogen merupakan dua parameter yang menjadi perhatian khusus penyebab pencemaran lingkungan. Karakteristik lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti: komposisi dan tingkat dekomposisi sampah; kondisi iklim selama proses pembuangan sampah; proses kompaksi ketika di landfill; penutup landfill dan tinggi landfill; kelembaban dan temperatur; serta umur landfill (Fernandes *et al.*, 2015). Karakteristik lindi berdasarkan umur landfill dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Klasifikasi lindi berdasarkan umur landfill

Kandungan Lindi	<i>Young Landfill</i>	<i>Stabilized</i>
	<i>Leachates</i> (<1-2 tahun)	<i>Leachates</i> (> 5-10 tahun)
pH	6	6,6 – 7,5
Ammonia nitrogen (mg/L)	10-800	20-40
COD (mg/L)	3.000-60.000	100-500
BOD/COD	0,6 - 1	0-0,3
Sulfate (mg/L)	50-1000	20-50
Klorida (mg/L)	200-300	100-400

Sumber : O'leary and Tchobanoglous, 2002; Alvarez-Vazquez *et al.*, 2004)

Seperti terlihat pada Tabel 2.1, pada landfill muda, lindi dicirikan dengan nilai COD yang tinggi (tipikal > 18.000 mg/L) dan rasio BOD/COD yang tinggi (tipikal >0,6). Sedangkan, lindi dari landfill tua mempunyai kandungan COD yang lebih rendah (100-500) mg/L dan rasio BOD/COD 0-0,3.

2.1.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Baku mutu lindi di Indonesia telah diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Baku mutu lindi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Baku Mutu Lindi di Indonesia		
Komponen	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg L ⁻¹
COD	300	mg L ⁻¹
TSS	100	mg L ⁻¹
N Total	60	mg L ⁻¹
Merkuri	0,005	mg L ⁻¹
Kadmium	0,1	mg L ⁻¹

Sumber: PERMENLHK Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi usaha dan/atau kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

2.1.3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik

Lindi yang dihasilkan dari TPA Ngipik termasuk ke dalam jenis lindi tua karena dihasilkan sel timbunan sampah yang berusia > 10 tahun (Sari, 2017). Karakteristik lindi TPA Ngipik dapat dilihat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Karakteristik TPA Ngipik, Gresik		
Parameter	Satuan	Nilai
COD	mg L ⁻¹	5800 ^[1]
NH ₄ -N	mg L ⁻¹	213,21 ^[1]
Cl ⁻	mg L ⁻¹	2268,00 ^[1]
BOD	mg L ⁻¹	124,32 ^[1]
TDS	mg L ⁻¹	2370 ^[1]
pH	-	7,67 ^[1]

Sumber: (Sari, 2017)

Berdasarkan Tabel 2.3, dapat dilihat bahwa lindi di TPA Ngipik Gresik merupakan lindi bersalinitas tinggi. Berdasarkan Abdullah (2017), tingginya salinitas lindi TPA Ngipik Gresik ini dipengaruhi oleh intrusi air laut.

2.1.4 Karakteristik Lindi di Indonesia

Karakteristik lindi di beberapa TPA Sampah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Karakteristik Lindi di Indonesia

Parameter	TPA Sarimukti [1]	TPA Air Dingin ^[2]	TPA Sukoharjo [3]	TPA Jatibarang [4]	TPA Ngipik [5]	TPA Bantar Gebang [6]
pH	8,7	7,4	8,45	8,5	8,36	NA
BOD ₅ (mg O ₂ /L)	42,9	NA	235	1600	601	323
COD (mg O ₂ /L)	213,4	NA	502	4000	7062	2947
Ammonia (mg/L)	6906,72	NA	NA	NA	602,9	621
TDS (mg/L)	NA	1893,3	NA	NA	NA	NA
TSS (mg/L)	NA	NA	NA	522	NA	250
Alkalinitas (mg CaCO ₃ /L)	13000	NA	NA	NA	NA	NA
TDS µs/cm	51,2	159,5	NA	NA	NA	NA
TOC (mg/L)	855,8	NA	NA	NA	NA	NA
Suhu (°C)	23	30,2	NA	28,7	NA	NA

Sumber:

[1] Karakteristik lindi merupakan hasil pengenceran 10x (Sururi *et al.*, 2014)

[2] (Afdal and Sari, 2017).

[3] (Wasis Wildan *et al.*, 2017)

[4] Air lindi yang dihasilkan oleh TPA Jatibarang dikategorikan sebagai lindi tua karena telah berusia lebih dari 10 tahun (IPAL berdiri sekitar akhir tahun 1990-an atau awal 2000) (Rezagama *et al.*, 2016)

[5] (Huda , 2017)

[6] (Lindu *et al.*, 2017)

2.1.5 Dampak Lindi Terhadap Lingkungan

Kontaminan yang bervariasi yang terkandung di dalam lindi bersifat toksik akut dan kronis (Deng and Englehardt, 2007). Senyawa toksik yang terkandung dalam lindi antara lain: ammonia, senyawa organik halogen, XOCs, *humic acid*, klorida, tembaga dan lain sebagainya. Ammonia nitrogen diindikasikan sebagai penyebab utama sifat toksik pada lindi (Thomas *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2016a). Tingginya konsentrasi ammonia yang tidak terolah dapat menyebabkan eutrofikasi, mengurangi kandungan oksigen terlarut di dalam air, dan memiliki efek toksik terhadap organisme perairan (Fatta *et al.*, 1999).

2.2 Alternatif Pengolahan Lindi

Pengolahan lindi dapat dilakukan dengan proses biologis, proses fisik-kimia, ataupun kombinasi dari keduanya. Alternatif-alternatif pengolahan lindi adalah sebagai berikut.

2.2.1 Pengolahan Biologis

Pada pengolahan biologis, proses degradasi senyawa organik dilakukan oleh mikroorganisme. Proses degradasi senyawa organik pada kondisi aerob akan menghasilkan CO₂ dan lumpur, sedangkan pada kondisi anaerob akan menghasilkan biogas (Lema *et al.*, 1988). Pengolahan biologis sangat efektif untuk mengolah senyawa organik dan nitrogen pada lindi muda, yang tingkat biodegradabilitasnya tinggi. Namun, kehadiran senyawa *refractory*, seperti asam humat dan asam fulvat membuat pengolahan ini menjadi kurang efektif untuk mengolah lindi (Renou *et al.*, 2008).

2.2.2 Pengolahan Fisik-Kimia

Pengolahan fisik-kimia tidak hanya cocok untuk mengolah senyawa *refractory* dari lindi stabil, namun juga cocok digunakan untuk mengolah lindi yang telah terolah dengan proses biologis. Pengolahan fisik-kimia yang dapat digunakan untuk mengolah lindi antara lain: koagulasi-flokulasi, presipitasi kimia, *ammonium stripping*, adsorpsi dan proses elektrokimia.

2.2.2.1 Koagulasi-Flokulasi

Koagulasi merupakan proses destabilisasi partikel koloid dengan penambahan koagulan. Untuk menambah ukuran partikel, koagulasi diikuti dengan proses flokulasi partikel yang belum stabil menjadi flokulan agar proses pengendapannya menjadi lebih mudah (Cheng *et al.*, 1994). Koagulan yang biasanya digunakan adalah alum, Besi (II) Sulfat (Fero Sulfat), Besi(III)Klorida (Feri Klorida), dan Feri Kloro-Sulfat (Amokrane *et al.*, 1997). Efektivitas proses koagulasi-flokulasi dalam mengolah lindi dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Efektivitas Proses Koagulasi-Flokulasi dalam Pengolahan Lindi

COD (mg/L)	BOD/COD	Koagulan	Dosis	% Penyisihan COD
100.000	-	Alum	3 (g/L)	38% ^[1]
4100	-	Besi (III) Klorida	0,035 mol/L	55% ^[2]
5690	-	Besi (III) Klorida	0,8 g/L	56% ^[3]
750	0,08	<i>Rhizomonas</i>	0,01-0,02	40 ^[4]

Sumber : ^[1](Tatsi *et al.*, 2003), ^[2] (Amokrane *et al.*, 1997), ^[3] (Diamadopoulos, 1994), ^[4] (Zouboulis *et al.*, 2004)

Proses koagulasi-flokulasi ini banyak digunakan dalam pengolahan lindi karena efisiensinya yang tinggi, penerapannya sederhana dan dapat meminimalisir biaya (Bakraouy *et al.*, 2017). Namun, proses ini juga memiliki kekurangan diantaranya: membutuhkan bahan kimia yang banyak, sensitif terhadap pH dan menghasilkan lumpur (Kurniawan *et al.*, 2006).

2.2.2.2 Presipitasi Kimia

Selama proses presipitasi kimia, ion terlarut terkonversi menjadi padatan yang tidak terlarut melalui reaksi kimia. Presipitasi kimia telah banyak digunakan untuk menyisihkan senyawa organik yang tidak dapat terdegradasi, ammonia nitrogen dan logam berat. Presipitasi kimia ini banyak digunakan karena kapabilitas, prosesnya yang sederhana, dan biayanya yang tidak mahal (Calli

et al., 2005; Cecen and Gürsoy, 2000; X. Z. Li and Zhao, 2001; X. Z. Li *et al.*, 1999; Ozturk *et al.*, 2003). Pada umumnya, presipitan yang digunakan untuk menyisihkan ammonia dan logam berat adalah *struvite* (Magnesium Ammonium Phosphat) atau kapur. Ozturk *et al.*, (2003) melakukan penelitian tentang penyisihan ammonia menggunakan metode presipitasi dengan *struvite*. Dengan konsentrasi COD 4024 mg/L dan NH₃-N 2240 mg/L, didapatkan penyisihan sebesar 50% untuk COD dan 90% untuk NH₃-N.

Keuntungan dari proses presipitasi menggunakan *struvite* adalah lumpur yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai pupuk N apabila lumpurnya tidak mengandung logam berat. Sedangkan, kelemahan dari proses presipitasi kimia ini yaitu membutuhkan dosis presipitan yang besar, sensitive terhadap pH, dan menghasilkan lumpur yang perlu pengolahan lebih lanjut.

2.2.2.3 Ammonium Stripping

Pada proses *ammonium stripping*, NH₃-N ditransfer dari aliran limbah ke udara dan kemudian diadsorbsi menjadi asam kuat seperti asam sulfat atau langsung berubah menjadi udara ambien (Bonmatí and Flotats, 2003). Efektivitas proses *ammonium stripping* dari berbagai penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Efektivitas proses *Ammonium Stripping* pada Pengolahan Lindi

NH ₃ -N (mg/L)	COD (mg/L)	Waktu Operasi	BOD/COD	Penambahan kapur	% R NH ₃ -N	% R COD
2215 ^[1]	NA	24 jam	NA	NA	95%	NA
3260 ^[2]	47800	12 jam	0,6	11 g/L	94%	15%
5618 ^[3]	7511	NA	0,22	NA	90%	47%
2240 ^[4]	4024	NA	NA	NA	90%	50%

Sumber : ^[1](Diamadopoulos, 1994), ^[2](Calli *et al.*, 2005), ^[3](X. Z. Li *et al.*, 1999), ^[4](Ozturk *et al.*, 2003)

2.2.2.4 Adsorbsi

Pada dasarnya, adsorbsi merupakan proses transfer massa dimana senyawa ditransfer dari fase cairan ke permukaan padatan

dan terjadi interaksi secara kimia atau fisika. *Granular Activated Carbon* (GAC) dan *Powder Activated Carbon* (PAC) merupakan adsorben yang sering digunakan untuk mengadsorbsi senyawa organik dan anorganik. Hal ini karena kedua adsorben tersebut memiliki area permukaan yang luas, *microporous structure*, kapasitas adsorbsinya yang tinggi dan permukaannya yang reaktif. Beberapa efektivitas pengolahan lindi dengan proses adsorbsi dapat dilihat pada Tabel 2.7.

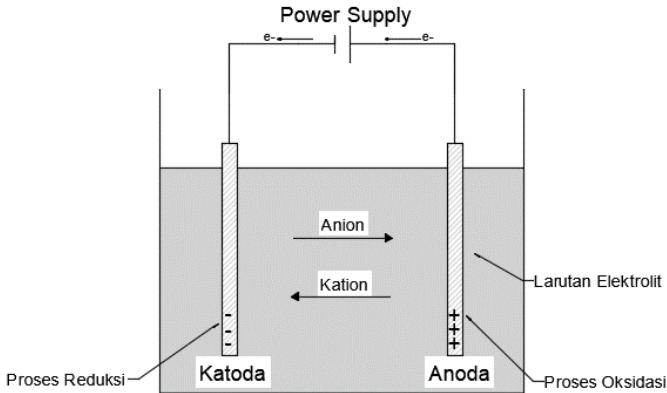
Tabel 2. 7 efektivitas Pengolahan Lindi dengan Proses Adsorbsi

COD (mg/L)	NH₃-N (mg/L)	BOD/COD	Adsorben	% R NH₃- N	% R COD
3450 ^[1]	1909	0,33	GAC	40	NA
5108 ^[2]	1876	0,2	GAC	NA	93
7000 ^[3]	700	NA	PAC	NA	87
7000 ^[3]	700	NA	Zeolite	NA	77

Sumber : ^[1](Aziz *et al.*, 2004), ^[2](Rodríguez *et al.*, 2004), ^[3](Kargı and Pamukoglu, 2004)

2.3 Oksidasi Elektrokimia

Bagian penting dari proses elektrooksidasi meliputi DC *power supply*, katoda, anoda dan larutan elektrolit (Gambar 2.1). Oksidasi elektrokimia merupakan salah satu proses elektrokimia yang paling banyak digunakan dalam menyisihkan polutan organik dari limbah. Proses elektrooksidasi ini merupakan proses oksidasi polutan organik di dalam sel elektrolit, yang dihasilkan dari dua elektroda yang terhubung dengan aliran listrik (Deng dan Englehardt, 2007).



Gambar 2. 1 Diagram proses elektrolisis
Sumber : Anglada *et al.* (2009), dengan modifikasi

Elektrooksidasi menunjukkan efisiensi pengolahan yang tinggi untuk parameter COD, amonium dan warna pada lindi. Selain itu, keunggulan utama dari proses elektrooksidasi adalah tidak menghasilkan lumpur (Mandal *et al.*, 2017). Proses oksidasi elektrokimia dapat menghilangkan zat warna, menurunkan kandungan organik, serta meningkatkan kemampuan biodegradasi pada lindi (Fernandes *et al.*, 2014). Proses elektrooksidasi juga efektif untuk menghancurkan polutan, terutama senyawa *refractory*, dan mampu menghilangkan senyawa organik dan ammonia dengan efisiensi penyisihan yang tinggi (Cabeza *et al.*, 2007). Selain itu, proses elektrooksidasi juga ramah lingkungan, membutuhkan sedikit atau bahkan tidak membutuhkan tambahan bahan kimia, menggunakan peralatan yang sederhana dan mudah dioperasikan (Anglada *et al.*, 2009). Perbandingan kelebihan dan kekurangan pengolahan lindi dengan proses oksidasi elektrokimia dengan alternatif pengolahan fisik-kimia lainnya dapat dilihat pada tabel berikut.

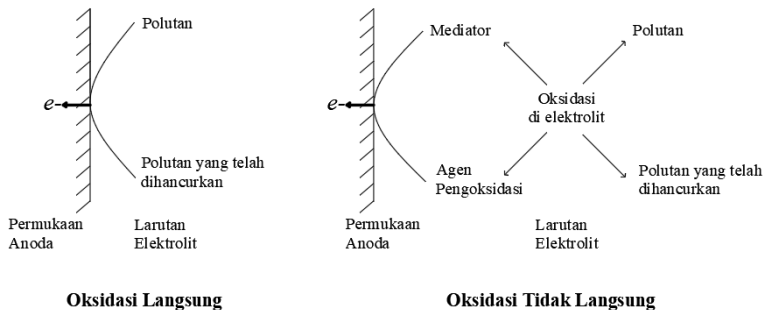
Tabel 2. 8 Kelebihan dan Kekurangan Pengolahan Lindi dengan Proses Fisik-Kimia

Pengolahan Fisik-Kimia	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
Koagulasi-Flokulasi	Efisiensi pengolahan lindi tinggi dan penerapannya sederhana.	Menghasilkan lumpur yang perlu diolah lebih lanjut	Bakraouy <i>et al.</i> , 2017; Kurniawan <i>et al.</i> , 2006
Presipitasi Kimia	Dapat menyisihkan senyawa organik yang tidak dapat terdegradasi, ammonia nitrogen dan logam berat. Presipitasi kimia ini banyak digunakan karena kapabilitas, prosesnya yang sederhana, dan biayanya yang tidak mahal.	Membutuhkan dosis presipitan yang besar, sensitive terhadap pH, dan menghasilkan lumpur yang perlu pengolahan lebih lanjut.	Calli <i>et al.</i> , 2005; Cecen and Gürsoy, 2000; X. Z. Li and Zhao, 2001; X. Z. Li <i>et al.</i> , 1999; Ozturk <i>et al.</i> , 2003
Ammonium Stripping	Dapat menyisihkan ammonium sebesar 90% pada konsentrasi ammonium 5618 mg/L.	Meningkatkan nilai pH apabila digunakan secara optimum.	X. Z. Li <i>et al.</i> , 1999; Ozturk <i>et al.</i> , 2003
Adsorbsi	Dapat menyisihkan COD sebesar 87% dengan konsentrasi awal 7000 mg/L	Perlu penambahan adsorben.	Kargi and Pamukoglu, 2004

Pengolahan Fisik-Kimia	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
Oksidasi Elektrokimia	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat menyisihkan COD dan ammonium mendekati 100% pada waktu 6-8 jam - Dapat menghilangkan zat warna, menurunkan kandungan organik, serta meningkatkan kemampuan biodegradasi pada lindi - Proses elektrooksidasi ramah lingkungan, membutuhkan sedikit atau bahkan tidak membutuhkan tambahan bahan kimia, menggunakan peralatan yang sederhana dan mudah dioperasikan. - Tidak menghasilkan lumpur 	<ul style="list-style-type: none"> - Membutuhkan energi listrik - Elektroda dapat mengalami korosif sehingga perlu diganti pada waktu tertentu. 	<p>Anglada <i>et al.</i>, 2009; Cabeza <i>et al.</i>, 2007; Fernandes <i>et al.</i>, 2014</p>

2.4 Mekanisme Proses Oksidasi Elektrokimia Senyawa Organik dan Ammonia

Proses penyisihan polutan dalam proses elektrooksidasi terbagi menjadi dua, yaitu elektrooksidasi langsung dan elektrooksidasi tidak langsung. Pada oksidasi langsung, pemindahan elektron terjadi langsung pada permukaan anoda. Proses oksidasi langsung ini menghasilkan dekontaminasi yang sangat lemah. Sedangkan, pada oksidasi tidak langsung, proses oksidasi terjadi melalui perantara agen pengoksidasi yang terbentuk akibat proses aktivasi air (Martínez-Huitle and Brillas, 2009). Proses oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Proses Oksidasi Langsung dan Oksidasi Tidak Langsung
Sumber : Anglada *et al.* (2009), dengan modifikasi

2.4.1 Oksidasi Langsung

Oksidasi langsung terjadi melalui dua tahap, yaitu: proses difusi polutan organik dari *bulk solution* ke permukaan anoda yang kemudian akan mengalami absorpsi; dan proses oksidasi polutan di permukaan anoda melalui transfer elektron (Persamaan 1).



Dimana:

R = polutan organik yang menjadi target

RO = polutan organik yang telah mengalami oksidasi

Proses elektrooksidasi langsung dapat berlangsung pada kondisi operasi lebih rendah dari potensial O_2 . Potensial O_2 merupakan

kondisi dimana evolusi oksigen dapat terjadi. Evolusi oksigen merupakan proses oksidasi air menjadi oksigen selama proses elektrokimia yang terjadi pada kondisi 1,2 Volt vs. *Normal Hydrogen Elektrode* (NHE). Laju oksidasi langsung biasanya rendah, tetapi hal ini sangat bergantung pada aktivitas elektrokimia dari masing-masing jenis anoda (Mandal *et al.*, 2017). Efisiensi dari proses elektrokimia juga bergantung pada interaksi antara transfer massa dari substrat dan transfer elektron pada permukaan elektroda (Anglada *et al.*, 2009).

2.4.2 Oksidasi Tidak Langsung

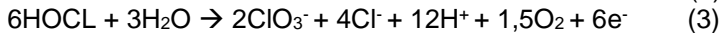
Oksidasi tidak langsung terjadi pada daerah yang berpotensi untuk terjadinya evolusi oksigen (Mandal *et al.*, 2017). Oksidasi tidak langsung merupakan reaksi kimia oleh spesies pengoksidasi yang terbentuk dari proses aktivasi air pada permukaan anoda. Spesies ini antara lain *physisorbed "active oxygen"* (*physisorbed* radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$)) atau *chemisorbed "active oxygen"* (anoda logam oksida (MO)). Berdasarkan perbedaan spesies tersebut, oksidasi tidak langsung dibedakan menjadi dua, yaitu *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion*. Pada *electrochemical conversion*, senyawa *refractory* diubah menjadi senyawa yang dapat terdegradasi (biasanya asam karboksilat) oleh *chemisorbed "active oxygen"*. Pada *electrochemical combustion*, senyawa organik teroksidasi menjadi CO_2 dan ion anorganik oleh *physisorbed* ($\cdot\text{OH}$). Senyawa radikal ini merupakan senyawa pengoksidasi terkuat kedua setelah Florin. Perbedaan pembentukan *chemisorbed "active oxygen"* dan *physisorbed* ($\cdot\text{OH}$) tergantung dari jenis anoda yang digunakan.

1) Oksidasi senyawa organik pada larutan elektrolit

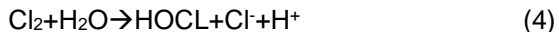
Selama proses elektrooksidasi tidak langsung, agen pengoksidasi yang kuat terbentuk di permukaan anoda yang kemudian merusak polutan di *bulk solution*. Agen pengoksidasi yang umumnya terbentuk selama proses elektrokimia adalah klorin yang terbentuk dari proses oksidasi klorida. Agen pengoksidasi lain yang biasa terbentuk adalah hipoklorit (OCl^-), asam hipoklorit (HClO), hidrogen peroksida (H_2O_2), asam peroksodisulat ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$), HBrO dan ozon. Keberhasilan dari mekanisme ini sangat bergantung pada jenis elektroda dan kondisi percobaan (Mandal *et al.*, 2017).

Berdasarkan Deng dan Englehardt (2006), rangkaian reaksi pembentukan klorin dan hipoklorit selama proses oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada persamaan 2 sampai 7.

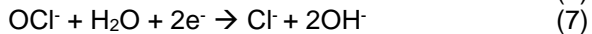
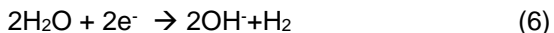
Reaksi pada anoda



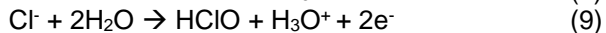
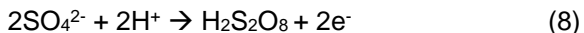
Reaksi pada larutan *bulk*



Reaksi pada katoda

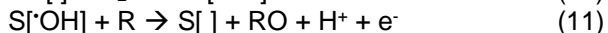
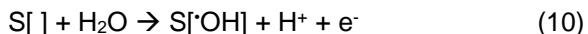


Keberadaan senyawa sulfat dan klorida pada limbah menyebabkan pembentukan $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ dan HClO (persamaan 8 dan 9) dari proses oksidasi oleh anoda.

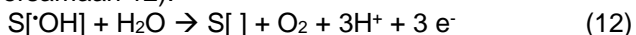


2) Oksidasi senyawa organik pada permukaan anoda

Melakukan proses elektrokimia pada kondisi potensial yang lebih besar dari potensial proses aktivasi air dapat menghasilkan senyawa hidroksil radikal ($\cdot\text{OH}$). Senyawa radikal ini merupakan senyawa oksidan terkuat kedua setelah Florin. Hidroksil radikal yang terbentuk pada proses elektrooksidasi tidak langsung akan teradsorpsi ke permukaan anoda (persamaan 10) dan membantu proses oksidasi senyawa organik (persamaan 11). Hidroksil radikal juga dinyatakan efektif untuk mendegradasi senyawa aromatik yang tidak dapat diolah dengan pengolahan biologis (Droguet *et al.*, 2007).

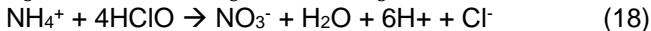
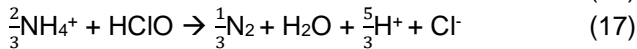
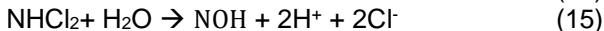
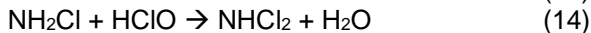
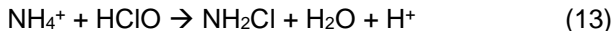


Dimana S menunjukkan tempat penyerapan hidroksil radikal, R menunjukkan polutan organik, RO menunjukkan polutan organik yang teroksidasi. Permasalahan pada proses oksidasi tidak langsung adalah sebagian kuat arus akan digunakan untuk reaksi evolusi O_2 (persamaan 12).



2.4.3 Mekanisme Penyisihan Ammonia

Ammonia termasuk polutan mayor yang terdapat pada lindi. Penyisihan ammonia terjadi pada proses oksidasi tidak langsung. Variabel operasi yang berpengaruh pada proses penyisihan ammonia adalah kerapatan arus dan konsentrasi klorida pada larutan elektrolit. Semakin tinggi kerapatan arus dan konsentrasi klorida, penyisihan senyawa ammonia juga akan semakin tinggi (Cabeza *et al.*, 2007). Penyisihan ammonia terjadi melalui pembentukan klorin atau hipoklorit selama proses elektroomoksidasi. Jadi, terdapat kompetisi antara oksidasi polutan organik (terukur sebagai COD) dan ammonia selama proses elektroomoksidasi. Proses penyisihan ammonia dapat dilihat pada persamaan 13 sampai 16, sedangkan melalui hipoklorit dapat dilihat pada persamaan 17 dan 18.



2.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Oksidasi Elektrokimia

Keefektifan pada proses elektroomoksidasi dalam menyisihkan polutan organik bergantung pada beberapa parameter, seperti: kerapatan arus, pH dan konsentrasi *active species*. Selain itu, jenis elektroda, jarak antar elektroda, konfigurasi reaktor elektrokimia, volume reaktor, jenis dan konsentrasi elektrolit yang digunakan juga mempengaruhi kinerja proses elektroomoksidasi.

2.5.1 Kerapatan Arus

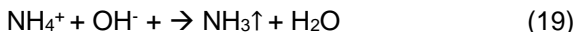
Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luasan elektroda pada proses elektroomoksidasi. Kerapatan arus merupakan parameter percobaan yang paling penting pada proses elektroomoksidasi. Kerapatan arus yang biasanya digunakan pada proses elektroomoksidasi di pengolahan lindi antara 5 hingga 540 mA cm⁻². Berdasarkan Cossu *et al.* (dalam Mandal *et al.* 2017), minimum kerapatan arus yang dibutuhkan adalah 5 mA cm⁻² agar

oksidasi senyawa organik dapat berjalan secara efektif. Peningkatan nilai kerapatan arus juga meningkatkan pembentukan klorin, yang dapat meningkatkan penyisihan polutan. Berdasarkan Zhou *et al* (2016), peningkatan kerapatan arus dari 20 hingga 50 mA cm⁻² meningkatkan oksidasi senyawa organik. Sedangkan, ketika kerapatan arus ditingkatkan hingga 100 mA cm⁻², penyisihan COD tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan. Quan *et al.*, 2013) juga mengatakan bahwa peningkatan penyisihan BOD dan ammonium yang efektif terjadi pada nilai kerapatan arus hingga 65 mA cm² (pada kisaran penelitian antara 13 hingga 78 mA cm⁻²). Sedangkan, ketika kerapatan arus ditingkatkan lebih dari 65 mA cm⁻², tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada penyisihan COD.

2.5.2 pH

Degradasi senyawa organik (terukur sebagai COD) dan ammonia sangat erat kaitannya dengan keberadaan *active species*. Berdasarkan Anglada *et al.* (2011), penyisihan COD sangat bergantung pada peranan radikal hidroksida, sedangkan penyisihan Ammonium sangat bergantung pada peranan oksidasi tidak langsung oleh klorin aktif. Keberadaan *active species* ini sangat tergantung dari pH lindi selama proses elektrooksidasi (Mandal *et al.*, 2017). pH asam dapat mereduksi konsentrasi ion karbonat (CO₃²⁻) dan bikarbonat (HCO₃⁻), sehingga laju penyisihan COD meningkat. Ion CO₃²⁻ dan HCO₃⁻ ini diketahui sebagai perusak radikal hidroksida.

Pembentukan oksigen (*oxygen evolution*), yang merupakan reaksi samping selama proses elektrooksidasi juga sangat tergantung pada pH. Pada pH basa, kuat arus lebih banyak digunakan untuk proses pembentukan oksigen dibandingkan dengan proses oksidasi senyawa organik. Hal ini dikarenakan pada pH basa, energi yang dibutuhkan untuk pembentukan oksigen (*potensial* O₂) lebih kecil dari pada saat pH asam (0,42 V pada suasana basa dan 1,229 V pada suasana asam) (Chu *et al.*, 2008). Chu *et al.* (2008) juga menjelaskan bahwa kondisi asam (pH 3) sangat menguntungkan untuk proses penyisihan COD. Namun, pada kondisi basa penyisihan ammonia meningkat karena pada pH 8, gas ammonia akan terbentuk (persamaan 19).



Berdasarkan Yavuz and Shahbazi (2012), pada $\text{pH} > 7,5$, klorin (Cl_2) menjauhi anoda dan membentuk ion hipoklorit (OCl^-) (persamaan 20). Sedangkan, pada $\text{pH} < 7,5$, Cl_2 membentuk asam hipoklorit (HClO) (persamaan 21). Pembentukan ion OCl^- dan HClO mempengaruhi proses oksidasi ammonia, karena efisiensi oksidasi dari HClO lebih besar dibandingkan dengan ion hipoklorit (persamaan 17 dan 18). Beberapa studi juga menyebutkan bahwa efisiensi dari proses penyisihan COD dan ammonia erat kaitannya dengan pembentukan ion hipoklorit. Apabila konsentrasi klorida meningkat, efisiensi penyisihan COD dan ammonia juga meningkat. Keberadaan senyawa klorida ini sangat berperan dalam proses oksidasi tidak langsung (Cabeza *et al.*, 2007).

Disisi lain, Panizza *et al.* (2010) mengatakan bahwa pada pH basa tingkat penyisihan COD meningkat. Panizza *et al.* (2010) menyimpulkan bahwa hal ini dikarenakan pada kondisi basa, hilangnya mediator terklorinasi dapat dicegah dimana mediator ini sangat berperan pada penyisihan COD.

2.5.3 Konfigurasi Reaktor (Membrane-devided Cell dan Undivided Cell)

Berdasarkan Bagastyo *et al.* (2014), pada proses pengolahan *reverse osmosis concentrate*, konsumsi energi listrik pada *membrane-devided cell* lebih tinggi dibandingkan dengan *undivided cell*, namun penyisihan COD dan DOC menunjukkan hasil yang sama untuk kedua konfigurasi reaktor tersebut. Pada penelitian tersebut, penyisihan COD sebesar 100% didapatkan pada muatan listrik 5 Ah/L, dimana pada *membrane-devided cell* konsumsi energi spesifik yang dibutuhkan adalah 0,34 kWh/g COD dan pada *undivided cell* konsumsi energi spesifik yang dibutuhkan adalah 0,24 kWh/g COD.

Penelitian mengenai proses elektrokimia pada pengolahan lindi dengan konfigurasi *undivided cell* yang dilakukan Abdullah (2015), dengan konsentrasi COD awal 5.612,2 mg/L, tingkat penyisihan COD pada pH 8,54 dengan penambahan 2 g/L NaCl sebesar 80,9% dengan konsumsi energi spesifik yang diperlukan adalah 4,7 kWh/m³. Sedangkan, pada penelitian yang dilakukan oleh Sari

(2017) menggunakan konfigurasi *membrane-devided cell* dengan konsentrasi COD awal 5800 mg/L, penyisihan COD pada pH 8,5 dengan penambahan 2 g/L sebesar 77,93% dengan konsumsi energi spesifik yang diperlukan adalah 11,067 11 kWh/ m³. Dengan mempertimbangkan hasil penelitian tersebut, dalam penelitian ini akan digunakan reaktor *undivided cell*.

2.5.4 Debit Aliran

Secara teoritis, meningkatkan debit aliran pada proses oksidasi elektrokimia dapat meningkatkan transfer massa dan mengurangi difusi ke permukaan anoda (Zhou *et al.*, 2017). Tingginya debit aliran juga dapat meningkatkan laju perpindahan klorida dari larutan *bulk* ke permukaan anoda sehingga menghasilkan perubahan klorin yang lebih besar. Berdasarkan Zhou *et al.* (2016), variasi debit aliran 0,55 mL/dtk; 1,1 mL/dtk, dan 1,67 mL/dtk tidak menunjukkan perubahan yang signifikan dalam penyisihan COD. Adapun penyisihan COD pada debit aliran 0,55 mL/dtk, 1,1 mL dtk dan 1,67 mL/dtk dalam penelitian tersebut adalah 84,98%; 81,38%, dan 87,5%. Namun, proses elektrooksidasi pada debit yang rendah harus dihindari. Hal ini karena semakin lama waktu tinggal elektrolit di dalam reaktor akan meningkatkan temperatur, bahkan dapat memanaskan larutan di dalam reaktor.

2.5.5 Jenis Elektroda

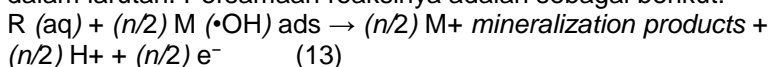
Salah satu hal penting yang mempengaruhi degradasi senyawa organik pada proses oksidasi elektrokimia adalah jenis elektroda. Pemilihan jenis elektroda merupakan pertimbangan yang penting karena dapat mempengaruhi selektivitas dan efektivitas proses elektrooksidasi. Sifat-sifat yang harus dimiliki material elektroda adalah sebagai berikut:

1. Memiliki stabilitas fisik dan kimia yang tinggi: tahan terhadap erosi dan pembentukan lapisan pasif
2. Memiliki konduktivitas listrik yang tinggi
3. Selektivitas dan aktivitas katalis
4. Biayanya murah dan memiliki *life time* yang panjang.

Selektifitas dari material anoda dapat dinilai berdasarkan kompetisi antara oksidasi senyawa organik pada anoda dan reaksi sampingnya berupa evolusi oksigen. Evolusi oksigen merupakan proses oksidasi air menjadi oksigen selama proses elektrolisis

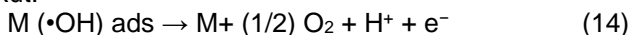
yang terjadi pada kondisi 1,2 V vs. *Normal Hydrogen Elektrode* (NHE) (Mandal *et al.*, 2017).

Mekanisme mineralisasi elektrokimia secara umum yaitu pada awalnya air mengalami *discharge* pada bagian anoda aktif (M). Kemudian, terbentuk radikal hidroksil yang teradsorbsi (M (•OH) ads) yang terlibat dalam proses mineralisasi polutan organik (R) di dalam larutan. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Dimana n adalah jumlah elektron yang terlibat dalam oksidasi senyawa organik.

Namun, reaksi diatas juga berkompetisi dengan reaksi lain untuk membentuk senyawa oksida (O₂). Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Laju reaksi pada persamaan 13 dan 14 ini sangat bergantung pada interaksi (OH•) terhadap permukaan anoda. Berdasarkan Comninellis (1994), jenis anoda berdasarkan reaksinya dengan (•OH) dibagi menjadi dua, yaitu anoda aktif dan anoda tidak aktif. Permukaan anoda aktif interaksinya sangat kuat dengan (OH•), sedangkan permukaan anoda tidak aktif interaksinya dengan (OH•) sangat lemah. Semakin rendah interaksinya, maka potensial O₂ semakin tinggi (evolusi oksigen semakin lemah), maka oksidasi senyawa organik akan semakin tinggi pula. Jadi, semakin tinggi potensial O₂, maka kekuatan oksidasi juga akan semakin tinggi.



Jenis elektroda yang saat ini banyak digunakan adalah Iridium (Ir), Ruthenium (Ru), Titanium (Ti), Timah Oksida (SnO₂), Timbal (IV) Oksida (PbO₂), Karbon dan Grafit, Platinum (Pt) dan *Boron-Doped Diamond* (BDD).

Anoda karbon dan grafit digunakan secara luas untuk degradasi senyawa organik karena memiliki harga yang ekonomis. Anoda grafit secara efektif menyisihkan 68% COD pada lindi yang konsentrasinya 1414 mg/L. Tetapi, anoda ini tidak efektif untuk menaikkan indeks biodegradabilitas dan bersifat korosif pada

kerapatan arus yang tinggi dan kehadiran klorin aktif (Bashir *et al.*, 2009; Mussa *et al.*, 2015)

Anoda lain yang banyak digunakan adalah platinum yang dilapisi dengan titanium karena memiliki konduktifitas yang tinggi, stuktur kimia yang stabil dan umur penggunaan yang panjang. Anoda ini dapat menyisihkan 60% COD dan 80-100% ammonia (Mandal *et al.*, 2017). Perbedaan jenis anoda berdasarkan kekuatan oksidasinya dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Kekuatan Oksidasi Beberapa Jenis Anoda yang digunakan pada Mineralisasi Elektrokimia pada Media Asam

Elektroda	Potensi Oksidasi (V)	Entalpi Adsorpsi M-OH	O ₂ Over-potential (V)	Kekuatan oksidasi anoda
RuO ₂ -TiO ₂ (DSA-Cl ₂)	1,4-1,7		0,18	
IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ (DSA-O ₂)	1,5-1,8		0,25	
Ti/Pt	1,7-1,9		0,3	
Ti/PbO ₂	1,8-2,0		0,5	
Ti/SnO ₂ -Sb ₂ O ₅	1,9-2,2		0,7	
p-Si/BDD	2,2-2,6		1,3	

Sumber : Comninellis *et al.*, (2008) dengan modifikasi

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa anoda BDD memiliki kekuatan oksidasi yang paling tinggi dibandingkan dengan RuO₂-TiO₂, IrO₂-Ta₂O₅, Ti/Pt, Ti/PbO₂ dan Ti/SnO₂-Sb₂O₅. Kelebihan dan kekurangan beberapa jenis anoda dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2. 10 Perbandingan Kinerja Elektroda pada Proses Elektrooksidasi

Elektroda	Kelebihan	Kelemahan	Perbandingan dengan Anoda Lain
Ti	Stabil	Pasif dan mahal	Efisiensi oksidasi senyawa organik pada permukaan anoda lemah.
Pt	Inert, potensial O ₂ tinggi	Mahal	

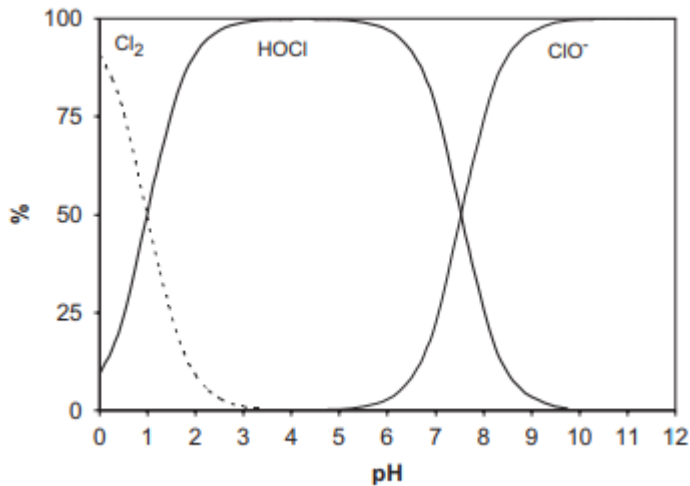
Elektroda	Kelebihan	Kelemahan	Perbandingan dengan Anoda Lain
PbO ₂	Efisiensi listrik baik, murah, efektif untuk mengoksidasi polutan, potensial O ₂ tinggi, mudah dalam penggunaan	Korosif, dapat menghasilkan ion Pb ²⁺ yang bersifat toksik	
Elektroda DSA	Bagus untuk oksidasi tidak langsung, efisiensi listrik bagus, potensial O ₂ tinggi, harga lebih murah, dan mudah didapatkan	Memiliki <i>lifetime</i> yang singkat, kurangnya stabilitas elektrokimia	
BDD	Bersifat inert pada kondisi apapun, potensial O ₂ tinggi, stabilitas elektrokimia tinggi, efisiensi listrik tinggi, tidak korosif, memiliki konduktivitas yang baik	Mahal	Memiliki aktivitas paling tinggi

Sumber : Särkkä *et al.* (2015), dengan modifikasi

2.5.6 Konsentrasi Ion Klorida

Penambahan ion klorida umumnya dapat meningkatkan proses oksidasi elektrokimia lindi melalui proses oksidasi tidak langsung oleh klorin/hipoklorit yang dihasilkan. Berdasarkan Li *et al.* (2001), tingkat penyisihan COD meningkat pada konsentrasi ion klorida 2500 hingga 5000 mg/L, namun menjadi lambat pada 5000 mg/L hingga 10.000 mg/L. Salah satu kelemahan proses elektrooksidasi dengan keberadaan senyawa klorida yang tinggi adalah terbentuknya senyawa organik terklorinasi dan senyawa anorganik terklorinasi (Farhat *et al.*, 2017).

Produk klorin yang dominan di dalam larutan elektrolit akan berbeda pada perbedaan kondisi pH. Senyawa klorin yang dominan adalah klorin (Cl_2) pada pH 1-3, HOCl pada pH 5-7, dan OCl^- pada pH lebih dari 7. Persenyawaan klorin berdasarkan nilai pH dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Persenyawaan Klorin Berdasarkan Nilai pH
Sumber: Deborde and von Gunten (2008)

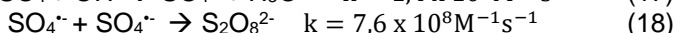
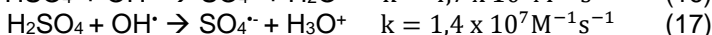
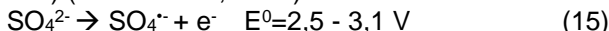
Gambar 2.3 menggambarkan distribusi Cl_2 , HOCl dan OCl^- berdasarkan level pH. Dari gambar tersebut terlihat bahwa Cl_2 mengalami proses hidrolisis di air secara lengkap pada pH >4. HOCl yang dihasilkan merupakan asam lemah yang mengalami disosiasi menjadi OCl^- (Persamaan 5). Bentuk persenyawaan klorin tersebut memiliki reaktifitas yang berbeda dengan mikroorganisme dan mikropolutan (Deborde and von Gunten, 2008).

2.6 Anoda Boron-Doped Diamond (BDD)

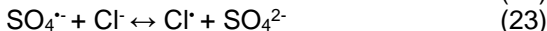
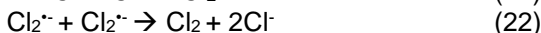
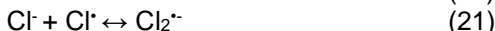
Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD) memiliki permukaan yang inert, tahan terhadap korosi bahkan ketika pada pH asam. Anoda BDD juga memiliki potensial O_2 yang sangat tinggi (2,7 V untuk Ti/BDD) yang berarti hidroksil radikal akan terbentuk lebih banyak

pada permukaan anoda. Anoda BDD juga dapat mendegradasi senyawa *refractory* mendekati 100% dan karakteristik polutan juga tidak mempengaruhi efisiensi proses secara signifikan. Anoda BDD dicirikan dengan laju oksidasi senyawa organik yang tinggi serta efisien dalam penggunaan energi listrik. Anoda BDD pernah digunakan dalam proses elektrooksidasi untuk mengolah limbah industri dan sintesis. Penggunaan energi spesifik selama proses pengolahan tersebut jika efisiensi kuat arus 100% adalah sekitar 22 kWh Kg⁻¹ COD.

Anoda BDD telah digunakan secara luas untuk mengaktivasi air untuk menghasilkan radikal hidroksil (OH[•]) dan mendegradasi senyawa organik. Anoda BDD juga menunjukkan kemampuan untuk mengaktivasi ion-ion di dalam lindi membentuk senyawa radikal seperti: klorida (Cl[•], Cl₂^{••}), karbonat (CO₃^{••}), fosfat (H₂PO₄[•], PO₄^{2-•}) dan sulfat (SO₄^{••}). Pembentukan SO₄^{••} pada anoda BDD ini dapat menghasilkan potensi redoks yang tinggi [E^0 (SO₄^{••}/SO₄²⁻) = 2,5–3,1 V)], mirip dengan potensial redoks OH[•] [E^0 (OH[•]/H₂O) = 1,8-2,7 V]. Pada proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD, SO₄^{••} terbentuk akibat proses elektrolisis langsung ion sulfat atau melalui reaksi antara OH[•] dengan HSO₄⁻ dan H₂SO₄ (Persamaan 15-18) (Farhat *et al.*, 2017).



Selain dapat membentuk klorin (Cl₂) dan asam hipoklorit (HOCl) (persamaan 2 dan 4), klorida yang terkandung di dalam larutan juga dapat membentuk radikal klorida (Cl[•] dan Cl₂^{••}). Reaksi pembentukan senyawa radikal klorida belum dijelaskan secara pasti, namun rekasinya dapat dianalogikan seperti pada persamaan 19 hingga 23.



Beberapa tahun terakhir, kombinasi dari oksidasi elektrokimia (elektrooksidasi) dengan pengolahan biologis menjadi alternatif yang diterapkan untuk mengolah limbah. Hal ini dikarenakan kombinasi pengolahan ini memerlukan biaya yang lebih efisien dibandingkan dengan pengolahan dengan oksidasi elektrokimia itu sendiri. Pada metode ini, oksidasi elektrokimia dijadikan sebagai pengolahan pendahuluan maupun pengolahan lanjutan (Zhao *et al.*, 2010).

2.7 Perhitungan Efisiensi Proses

2.7.1 Hukum Coulomb

Besarnya listrik yang mengalir yang dinyatakan dalam Coulomb merupakan arus listrik dikalikan dengan waktu operasi. Hubungan muatan listrik dengan kuat arus dinyatakan dalam rumus berikut:

$$Q = i \times t \quad (25)$$

i : kuat arus (A)

t : waktu (s)

Q : muatan listrik (coloumb)

2.7.2 Konsumsi energi spesifik

Kelayakan proses dalam aplikasi elektrokimia dapat dievaluasi dari efisiensi penurunan polutan dan dari aspek ekonomi kelayakan ditentukan oleh konsumsi energi spesifik. Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik.

$$Q = \frac{J \times A \times t}{v} \quad (26)$$

Sedangkan kerapatan arus (J) adalah kuat arus listrik yang mengalir di area elektroda.

$$J = \frac{i}{A} \quad (27)$$

Oleh karena itu, muatan listrik spesifik dapat dicari melalui persamaan:

$$Q = \frac{i \times t}{v} \quad (28)$$

Konsumsi energi spesifik (W) secara langsung berkaitan dengan muatan listrik spesifik (Q) dan tegangan listrik tertentu (V). Berikut ini merupakan persamaan konsumsi energi selama elektrolisis:

$$W = Q \times V$$

Dimana:

W : konsumsi energi spesifik (kWh/m³)

Q : muatan listrik spesifik (kAh/m³)

I : kuat arus listrik (A)

J : kerapatan arus (A/m²)

V : tegangan listrik (V)

A : luas elektroda (m²)

t : waktu operasi (s)

v : volume elektrolit (L)

(Anglada *et al.*, 2009).

2.7.3 Instantaneous Current Efficiency (ICE)

Instantaneous current efficiency (ICE) menunjukkan seberapa besar kuat arus yang digunakan untuk proses oksidasi. ICE dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$ICE = \frac{4FV}{I} \frac{[(COD)_t - (COD)_{t+\Delta t}]}{\Delta t} \quad (29)$$

Dimana $(COD)_t$ dan $(COD)_{t+\Delta t}$ berturut-turut merupakan nilai COD (mg O₂ L⁻¹) pada waktu ke t dan Δt , I merupakan nilai kuat arus yang digunakan (Ampere), F merupakan *Faraday constant* dan V merupakan volume elektrolit (M. Panizza *et al.*, 2008).

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu berfungsi sebagai referensi dalam pelaksanaan dan pembahasan pada penelitian. Berikut adalah penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai acuan berkaitan dengan proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda BDD dalam pengolahan lindi.

1. Zhou *et al.* (2016) melakukan penelitian mengenai pengolahan lindi dengan elektrolisis menggunakan anoda BDD. Percobaan dilakukan pada pH 5,16; pH 7,02 dan pH 10 dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻², serta kecepatan aliran 6 l/jam. Kondisi percobaan ini dibuat untuk

mengetahui pengaruh pH terhadap penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$. Hasilnya, pada pH 5,16, penyisihan COD sebesar 87,5% dan $\text{NH}_3\text{-N}$ sebesar 74,06% selama 6 jam. Pada pH 10, penyisihan COD sebesar 65,02% dan $\text{NH}_3\text{-N}$ hanya 49,85%. Sedangkan, pada pH 7,02, penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ sedikit berkurang dibandingkan penyisihan pada pH 5,16. Dapat disimpulkan bahwa tingkat penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ pada pH basa lebih rendah dibandingkan pada pH asam dan netral. Hal ini dikarenakan pada pH asam, pembentukan radikal hidroksida dan klorin aktif lebih banyak, dimana kedua senyawa ini sangat berperan dalam penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$.

2. Berdasarkan (Pérez *et al.*, 2012), Ammonium dapat berhasil disisihkan dengan proses elektrooksidasi pada air limbah yang mengandung ion klorida dengan menggunakan anoda *Boron-doped Diamond* (BDD). Dua variasi konsentrasi klorida diperoleh dari air limbah industri dan lindi. Dari penelitian ini gas nitrogen dan nitrat menjadi produk utama dari oksidasi amonium dari proses. Konsentrasi klorida yang lebih tinggi memiliki dampak positif pada kinetika reaksi penyisihan amonium dan pembentukan nitrogen.
3. Berdasarkan Bagastyo *et al.* (2013), dengan penambahan Na_2SO_4 0,05 M pada proses elektrooksidasi dengan anoda BDD, dapat meningkatkan penyisihan COD dan DOC dari 60% menjadi 74% dan 41% menjadi 51%.
4. Cabeza *et al.* (2007) melakukan penelitian mengenai pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD. Variasi pertama dari penelitian ini adalah kerapatan arus dan konsentrasi dari COD (3500, 1800 dan 850 mg/L) dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (2000, 1000 dan 500 mg/L) dimana penyisihan COD dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ mendekati 100% setelah 6-8 jam. Pada proses ini laju penyisihan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ lebih lambat dibandingkan dengan COD. Ketika penyisihan COD hampir 100%, laju penyisihan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ baru menunjukkan peningkatan yang signifikan. Dalam hal ini dijelaskan bahwa penyisihan COD secara dominan terjadi melalui proses oksidasi langsung, sedangkan penyisihan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ terjadi melalui proses oksidasi tidak langsung. Percobaan lainnya adalah dengan memvariasikan

konsentrasi ion klorida (1420, 3670, 6350 dan 8570 mg/L) dengan nilai konsentrasi COD= 1000 mg/L dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ =700 mg/L. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi klorida tidak memberikan efek yang signifikan terhadap penyisihan COD, namun memberikan efek yang signifikan terhadap penyisihan $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Semakin tinggi konsentrasi klorida, tingkat penyisihan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ juga semakin tinggi.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Deskripsi Umum

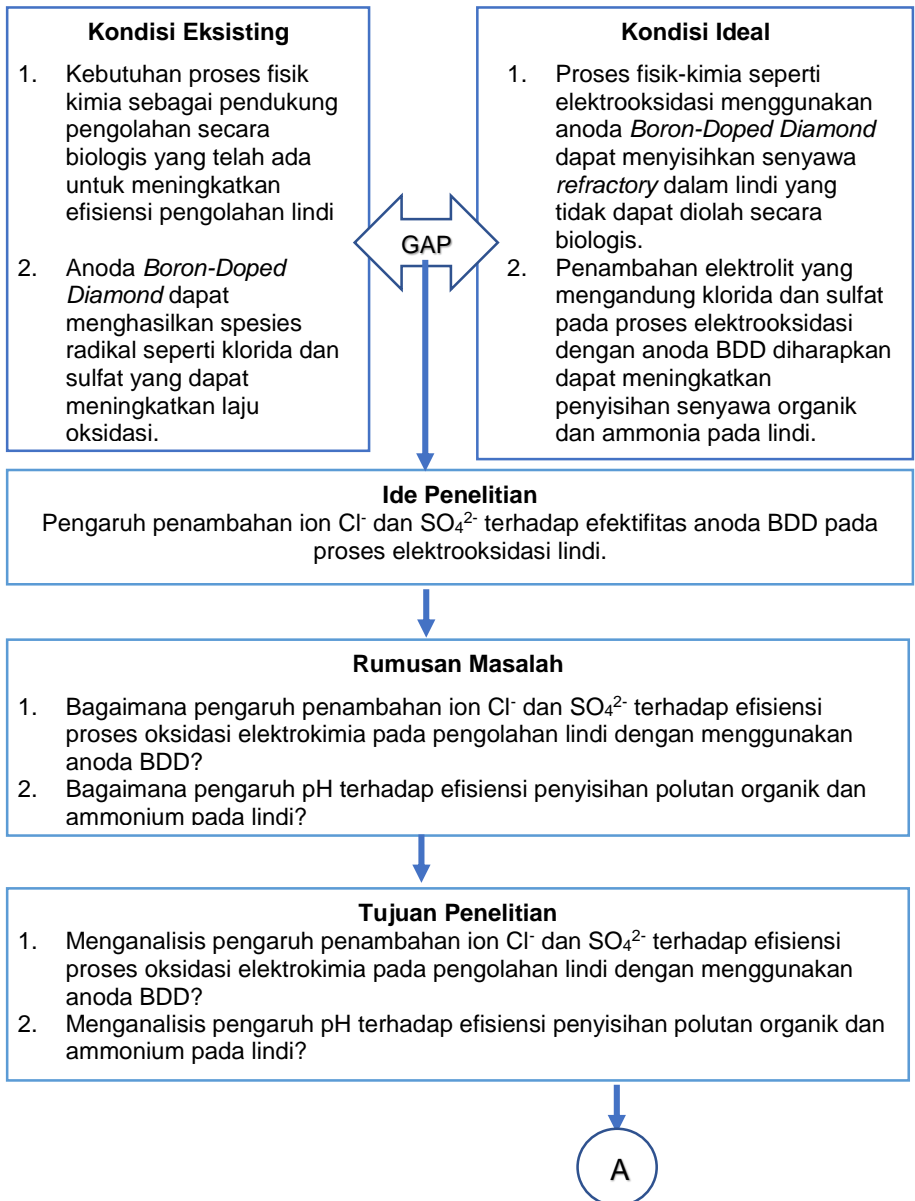
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi pengolahan lindi menggunakan proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD. Efisiensi dari proses oksidasi dilihat berdasarkan tingkat penyisihan polutan organik (terukur sebagai COD) dan ammonium. Bahan uji yang digunakan berasal dari Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) Ngipik, Gresik. Bahan uji diambil dari bak kontrol sebelum ABR. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Air Departemen Teknik Lingkungan ITS selama bulan Februari hingga Juni 2018.

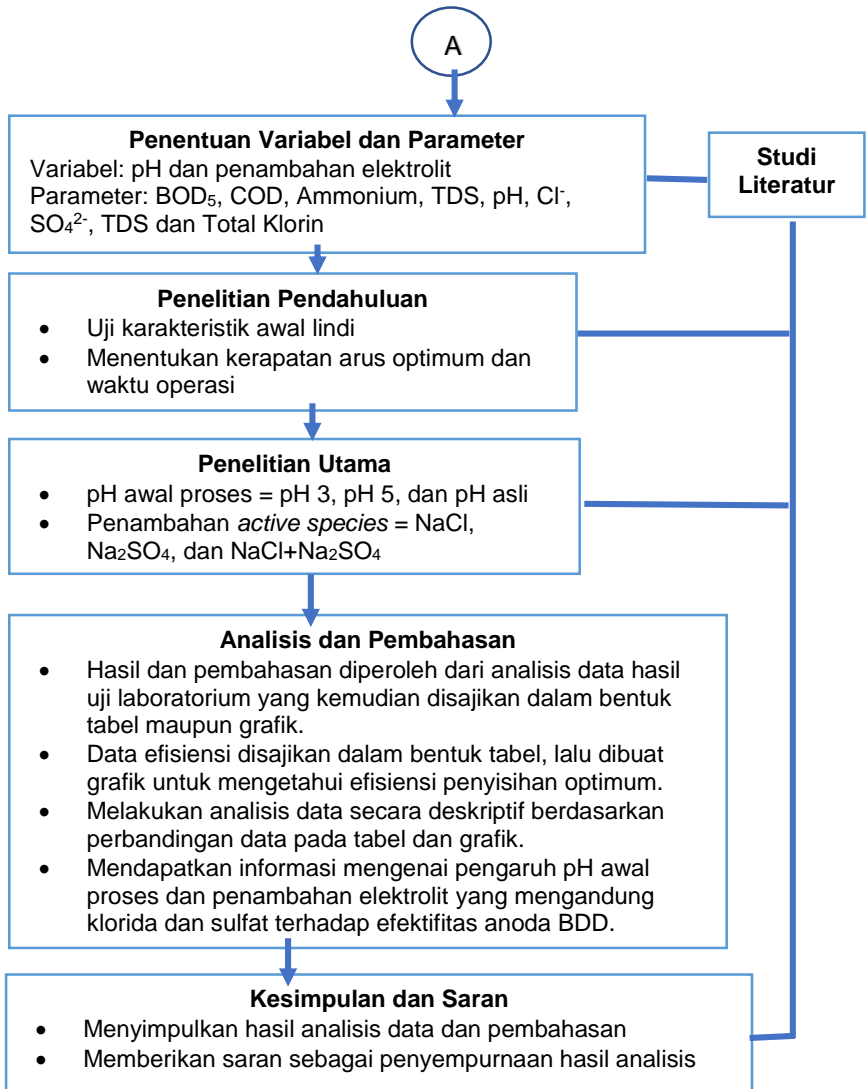
3.2 Kerangka Penelitian

Metode penelitian ini disusun dalam bentuk kerangka penelitian. Kerangka penelitian ini berfungsi sebagai pedoman untuk memudahkan pelaksanaan penelitian karena berisi langkah-langkah yang dilakukan selama penelitian. Kerangka penelitian ini meliputi ide penelitian, perumusan masalah, penentuan variabel dan parameter, pelaksanaan penelitian pendahuluan dan utama hingga analisis pembahasan dan kesimpulan. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.

3.2.1 Ide Penelitian

Ide penelitian ini berasal dari gap antara kondisi eksisting dengan kondisi ideal. Hal yang mendasari ide penelitian ini adalah kebutuhan alternatif pengolahan fisik kimia untuk meningkatkan efisiensi pengolahan lindi. Proses elektrooksidasi dengan menggunakan anoda BDD saat ini sedang menjadi perhatian karena sangat efektif untuk menyisihkan polutan organik pada lindi. Anoda BDD ini dapat mengaktivasi senyawa radikal seperti klorida dan sulfat yang dapat meningkatkan laju oksidasi senyawa organik. Sehingga, perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan ion klorida dan sulfat terhadap efisiensi proses tersebut. Metode elektrooksidasi ini dapat dioptimalkan dengan memvariasikan pH dan penambahan *active species*.





3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap pencarian informasi untuk meningkatkan pengetahuan peneliti. Informasi ini dapat diperoleh

melalui buku, jurnal penelitian, artikel, laporan tugas akhir, *thesis*, asistensi dengan dosen pembimbing, dan sebagainya. Literatur yang dapat menunjang penelitian ini adalah mengenai hal-hal berikut ini:

- Karakteristik dan komposisi lindi
- Alternatif pengolahan lindi
- Mekanisme proses elektrooksidasi dalam menurunkan polutan organik dan ammonia pada lindi
- Faktor-faktor yang mempengaruhi proses elektrooksidasi
- Anoda *Boron-Doped Diamond* (BDD)

3.2.3 Penentuan variabel dan parameter

Variasi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1) pH awal proses

pH pada proses oksidasi elektrokimia sangat berpengaruh terhadap pembentukan *active species* yang berperan dalam proses oksidasi senyawa organik dan ammonium. Menurut Zhou *et al.* (2016), pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD dengan pH 5,16 (asam) dapat menghasilkan penyisihan COD dan ammonium yang lebih tinggi dibandingkan pada pH 10 (basa). Chu *et al.* (2008) juga menjelaskan bahwa kondisi asam (pH 3) sangat menguntungkan untuk proses penyisihan COD. Senyawa klorin yang dominan adalah klorin (Cl_2) pada pH 1-3, HClO pada pH 5-7, dan OCl^- pada pH lebih dari 7. Dengan mempertimbangkan hasil penelitian oleh Zhou *et al.* (2016), Chu *et al.* (2008), dan keberadaan senyawa klorin berdasarkan pH tersebut diatas, pH awal proses yang digunakan dalam penelitian ini adalah pH 3, pH 5, dan pH asli lindi.

2) Penambahan elektrolit

Variabel kedua dalam penelitian ini adalah penambahan elektrolit. Elektrolit yang digunakan adalah NaCl dan Na_2SO_4 . Penggunaan kedua elektrolit ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh ion klorida dan sulfat terhadap efisiensi pengolahan lindi dengan proses oksidasi elektrokimia menggunakan anoda BDD. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa anoda BDD dapat menghasilkan radikal klorida dan sulfat yang dapat meningkatkan

laju oksidasi. Variasi penambahan ion klorida dan sulfat ini yaitu: penambahan NaCl, Na₂SO₄, dan NaCl+ Na₂SO₄.

Parameter yang diuji pada penelitian ini antara lain BOD₅, COD, Cl⁻, SO₄²⁻, Ammonium, pH, TDS, TOC dan Total Klorin. Nilai COD, ammonium, total klorin, pH dan TDS diukur pada setiap titik waktu sampling. Sedangkan untuk parameter Cl⁻ dan SO₄²⁻ diuji pada t₀, t₃ dan t akhir. Kemudian untuk parameter BOD₅ dan TOC hanya diuji pada t₀ dan t akhir untuk melihat perubahan rasio BOD₅/COD. Metode analisis setiap parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter

No	Parameter	Tujuan	Metode	Sumber
1.	BOD ₅	Mengetahui tingkat biodegradabilitas lindi (BOD ₅ /COD)	Metode Winkler	SNI 6989.72:2009
2.	COD	Mengetahui tingkat penyisihan polutan organik dalam lindi.	Closed Reflux and colorimetric	SNI 6989.73:2009
3.	Cl ⁻	Untuk mengetahui kandungan klorida di dalam bahan uji dan pengaruhnya terhadap proses elektrooksidasi	Argentrometrik Mohr	SNI 06-6989.19-2004
4.	SO ₄ ²⁻	Untuk mengetahui kandungan sulfat di dalam lindi dan pengaruhnya terhadap proses elektrooksidasi	Turbidimetri	APHA; 2012
5.	Ammonium	Mengetahui kandungan	Nessler	SNI 6989.30-2005

No	Parameter	Tujuan	Metode	Sumber
		Ammonium dan tingkat penyisihan TAN dalam lindi		
6.	pH	Menganalisis kondisi keasaman bahan uji	Menggunakan pH meter	SNI 06-6989.11-2004
7.	TDS	Menganalisis daya hantar listrik bahan uji	Menggunakan Konduktimeter	SNI 06-6989.1-2004
8.	Total Klorin	Menganalisis total senyawa klorin yang terbentuk selama proses elektrolisis	DPD	APHA; 2012
9.	TOC	Menganalisis mineralisasi senyawa organik	TOC Analyzer	SNI 06-6989.28-2005

Sebelum diuji, sampel di saring terlebih dahulu menggunakan syringe filter berbahan PTFE 0,45 μm .

3.2.4 Persiapan Penelitian

Persiapan yang perlu dilakukan sebelum melakukan penelitian yaitu membuat reaktor skala laboratorium dan menyiapkan alat serta bahan yang diperlukan.

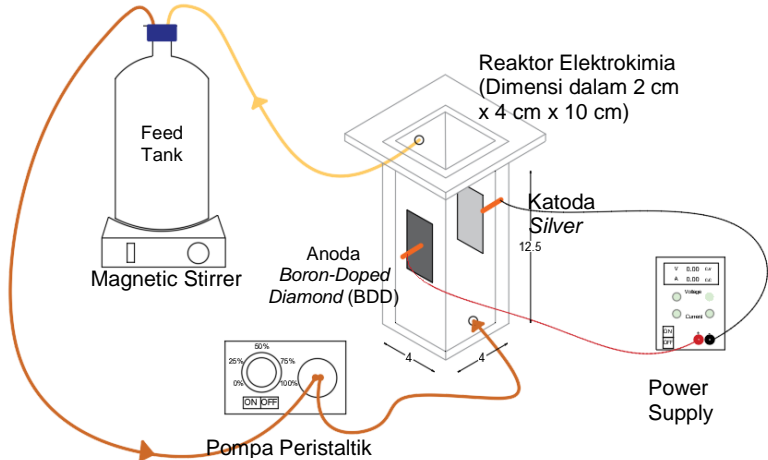
A. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Reaktor Elektrokimia

Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini terbuat dari bahan akrilik dengan tebal 0,5 cm. Ukuran reaktor yang digunakan adalah 2 cm x 4 cm x 10 cm (dimensi dalam, volume efektif 80 mL). Pada reaktor ini terdapat lubang sebagai inlet di bagian bawah dan outlet di bagian atas. Inlet dan outlet ini terletak pada sisi yang berseberangan. Reaktor terdiri dari satu kompartemen dimana anoda dan katoda diletakkan di dalam kompartemen yang sama. Pertimbangan untuk menggunakan satu kompartemen (*undivided cell*) ini

adalah berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Bagastyo *et al.* (2014) bahwa penyisihan COD pada konfigurasi reaktor *undivided cell* dan *membrane-divided cell* menunjukkan hasil yang sama. Namun, energi yang dibutuhkan pada sistem *undivided cell* lebih efisien dibandingkan pada sistem *membrane-divided cell*. Aliran dalam reaktor ini adalah *batch recirculation*. Lindi dialirkan dari *feed tank* ke reaktor dengan bantuan pompa peristaltik. Setelah lindi dalam reaktor penuh, lindi terdorong keluar melalui outlet dan dialirkan kembali ke *feed tank*. Skema reaktor elektrokimia dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Reaktor Elektrokimia

2. Elektroda

Elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah BDD sebagai anoda dan *Stainless Steel* sebagai katoda. Ukuran elektroda yang digunakan yaitu 2 cm x 4 cm. Jarak antara kedua elektroda yang digunakan adalah 2 cm. Sebelum digunakan untuk mengelektrooksidasi lindi, elektroda ini harus dipolarisasi terlebih dahulu dalam larutan asam kuat. Tujuan polarisasi ini adalah untuk mengkutubkan anoda dan katoda.

3. Pompa peristaltik

Pompa digunakan untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* ke reaktor elektrokimia. Debit yang digunakan dalam penelitian adalah 2 mL/detik. Sehingga, waktu tinggal lindi di dalam reaktor adalah 40 detik.

4. *DC Power Supply*

DC power supply ini berfungsi sebagai sumber listrik pada proses elektooksidasi lindi. Spesifikasi DC power supply yang digunakan adalah dengan arus listrik 0-3 A dan tegangan 0-30 V. Dalam penelitian ini, *DC Power Supply* akan di setting *constant current*, yang artinya kuat arus yang digunakan selama operasi reaktor dibuat constant, sehingga yang berubah adalah tegangannya.

5. Selang dengan diameter 0,5 cm

Selang digunakan untuk mengalirkan lindi dari *feed tank* ke reaktor dan sebaliknya. Selang yang digunakan adalah selang *chemical resistant* dengan pertimbangan bahwa lindi yang digunakan dalam beberapa perlakuan dikondisikan pada pH asam.

6. Kabel

Kabel digunakan untuk mengalirkan arus listrik dari DC *power supply* ke elektroda.

7. *Copper tape* dan kawat tembaga

Copper tape dan kawat tembaga ini digunakan untuk menghubungkan antara elektroda dengan DC *power supply*.

8. *Feed tank* dan *magnetic Stirrer*

Feed tank digunakan sebagai tempat untuk menampung lindi. *Feed tank* yang digunakan adalah botol duran dengan volume 1 L. Sedangkan, *magnetic stirrer* digunakan untuk menghomogenkan lindi di dalam *feed tank*.

B. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Lindi

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Ngipik, Gresik. Volume lindi yang digunakan dalam sekali perlakuan adalah 1 L. Untuk mengantisipasi adanya perubahan sifat fisik dan kimia pada bahan uji, maka dilakukan analisis karakteristik awal sebelum dilakukan percobaan. Jika terdapat perubahan sifat fisik dan kimia pada

bahan uji sebesar $\pm 10\%$, maka dilakukan pengambilan bahan uji ulang. Angka 10% ini merupakan angka deviasi, dimana saat dilapanganpun konsentrasi polutan organik pada lindi juga dapat berubah.

2. Padatan NaCl dan Na₂SO₄
Padatan NaCl dan Na₂SO₄ ini digunakan sebagai ion pendukung.
3. Asam nitrat
Asam nitrat digunakan untuk mengondisikan nilai pH karena dalam penelitian ini pH awal proses divariasikan pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Asam nitrat yang ditambahkan ke lindi tidak melebihi 10% dari volume lindi asli. Dalam penelitian ini, volume lindi yang digunakan setiap percobaan adalah 1 L, sehingga volume asam yang ditambahkan untuk mengondisikan nilai pH awal lindi tidak lebih dari 100 mL.
4. Reagen
Reagen yang digunakan untuk analisis parameter BOD₅, COD, Ammonium, Klorida, Sulfat, Total Klorin, TDS dan pH.

3.2.5 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan pada penelitian ini bertujuan untuk:

1. Uji karakteristik awal lindi
Parameter yang diuji pada penelitian pendahuluan ini yaitu BOD₅, COD, Cl⁻, SO₄²⁻, Ammonium, pH, dan TDS.
2. Penentuan rapat arus optimum dan waktu operasi
Tahapan penelitian pendahuluan ini adalah sebagai berikut:
 - a. Mengisi *feed tank* dengan lindi sebanyak 1 L.
 - b. Menghidupkan pompa dan mengisi reaktor hingga penuh
 - c. Menghidupkan DC *Power Supply* untuk memberikan arus listrik. Arus listrik ini mengalir melalui anoda dan katoda dimana anoda berkutub (+) dan katoda berkutub (-). Penelitian pendahuluan ini dilakukan sebanyak tiga kali dengan variasi kerapatan arus. Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luasan elektroda pada proses elektooksidasi. Kerapatan arus yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50 mA cm⁻², 75 mA cm⁻², dan 100 mA cm⁻² atau jika dinyatakan dalam kuat arus yaitu 0,4 A; 0,6 A dan 0,8 A.

- d. Waktu operasi pada penelitian pendahuluan untuk menentukan kerapatan arus optimum ini adalah 4-6 jam. Parameter yang diuji pada penelitian pendahuluan adalah COD, warna asli lindi, pH dan TDS.

Dari hasil penelitian tersebut, maka diperoleh kerapatan arus optimum dan waktu operasi yang akan digunakan untuk penelitian utama.

3.2.6 Penelitian Utama

Setelah didapatkan kerapatan arus optimum dan waktu operasi, kemudian dilakukan penelitian dengan variasi terhadap pH awal proses dan penambahan elektrolit. Variasi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Matriks Variasi Bahan uji Penelitian			
Penambahan Elektrolit	pH Awal Proses		
	pH 3 (A)	pH 5 (B)	pH asli (C)
NaCl (A)	AA	AB	AC
Na ₂ SO ₄ (B)	BA	BB	BC
NaCl+Na ₂ SO ₄ (C)	CA	CB	CC

Keterangan:

- AA : perlakuan dengan pH 3 dan penambahan 0,05M NaCl
 AB : perlakuan dengan pH 5 dan penambahan 0,05M NaCl
 AC : perlakuan dengan pH asli dan penambahan 0,05M NaCl
 BA : perlakuan dengan pH 3 dan penambahan 0,05M Na₂SO₄
 BB : perlakuan dengan pH 5 dan penambahan 0,05M Na₂SO₄
 BC : perlakuan dengan pH asli dan penambahan 0,05M Na₂SO₄
 CA : perlakuan dengan pH 3 dan penambahan 0,025M NaCl+ 0,025M Na₂SO₄
 CB : perlakuan dengan pH 5 dan penambahan 0,025M NaCl+ 0,025M Na₂SO₄
 CC : perlakuan dengan pH asli dan penambahan 0,025M NaCl+ 0,025M Na₂SO₄

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa dalam penelitian ini dilakukan 9 perlakuan. Penambahan asam dilakukan terlebih dahulu, lalu dilakukan penambahan elektrolit. Bahan uji kontrol

dalam penelitian ini adalah bahan uji pada penelitian pendahuluan dengan kuat arus optimum. Waktu operasi dalam penelitian ini berdasarkan hasil dari penelitian pendahuluan.

3.2.7 Analisis dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan dilakukan terhadap kualitas efluen yang dihasilkan berdasarkan parameter COD, ammonium dan konsumsi energy spesifik. Kemudian dianalisis dan dibahas mengenai pengaruh pH awal proses dan penambahan ion klorida dan sulfat terhadap penyisihan polutan organik dan ammonium pada lindi. Penyajian data hasil analisis ini dalam bentuk tabel dan grafik.

3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran merupakan tahapan terakhir dalam penelitian. Pada tahap ini, penulis menyimpulkan hasil analisis data dan pembahasan dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan ditulis sesuai hasil penelitian dan menjawab tujuan. Kesimpulan ditulis dalam poin-poin yang disajikan secara singkat dan jelas.

Saran merupakan rekomendasi untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya. Tujuan dari saran ini adalah untuk menyempurnakan dan memperbaiki penelitian sebelumnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan bertujuan untuk menganalisis karakteristik lindi, menentukan waktu operasi proses elektrooksidasi, serta menentukan kerapatan arus optimum yang digunakan dalam penelitian utama.

4.1.1 Karakteristik Awal Lindi

Lindi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari TPA Ngipik, Gresik. Lindi diambil pada inlet ABR saat musim hujan. Karakteristik lindi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Lindi TPA Ngipik, Gresik

Parameter	Unit	Konsentrasi
pH		8.5
TDS	mS cm ⁻¹	10.74
COD _{total}	mg O ₂ L ⁻¹	2040
Cl ⁻	mg L ⁻¹	1400
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	535
SO ₄ ²⁻	mg L ⁻¹	40,58
BOD ₅	mg O ₂ L ⁻¹	350
BOD ₅ /COD		0,171

Seperti yang terlihat pada Tabel 4.1, lindi dari TPA Ngipik Gresik mengandung nilai bahan organik (terukur sebagai COD) dan ammonium yang tinggi, yaitu 2040 mg L⁻¹ dan 535 mg L⁻¹. Apabila dibandingkan dengan baku mutu lindi di Indonesia yang tertera pada Tabel 2.2, konsentrasi kandungan organik dan ammonium pada lindi tersebut melebihi baku mutu lindi, yaitu 150 mg L⁻¹ dan 60 mg L⁻¹ untuk parameter BOD₅ dan N total. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan lindi sebelum dibuang ke lingkungan agar tidak mencemari air tanah dan air permukaan.

Berdasarkan pada Tabel 4.1, dapat dilihat pula bahwa nilai rasio BOD₅/COD sangat rendah, yaitu 0,171. Berdasarkan klasifikasi karakteristik lindi menurut O'leary and Tchobanoglous (2002);

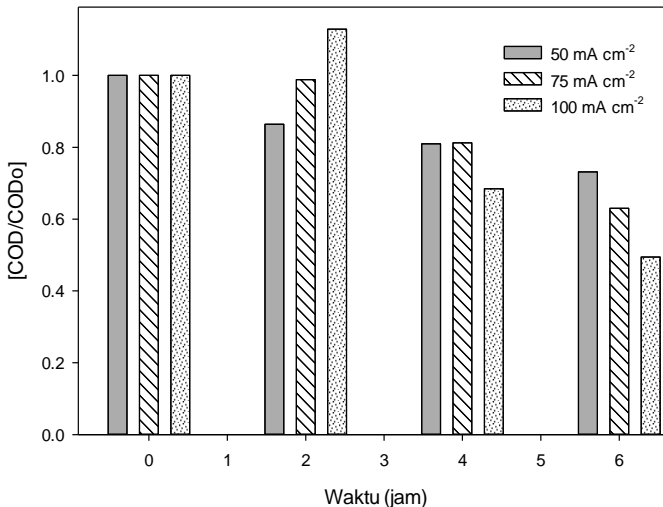
Alvarez-Vazquez *et al.* (2004) pada Tabel 2.1, lindi tersebut termasuk ke dalam lindi stabil. Berdasarkan Amokrane *et al.* (1997), pengolahan biologis sangat efektif untuk mengolah lindi yang dihasilkan dari landfill yang umurnya relatif lebih muda (1-2 tahun), yang kandungan utamanya adalah *volatile fatty acid*, namun kurang efektif untuk mengolah lindi yang umurnya relatif lebih tua. Lindi tua atau lindi terstabilisasi dicirikan dengan tingkat biodegradabilitas yang rendah (nilai BOD/COD < 0,5), sehingga sulit untuk diolah secara biologis. Kandungan ammonium yang tinggi juga dapat menjadi inhibitor bagi mikroorganisme pada proses pengolahan biologis (Tatsi *et al.*, 2003). Oleh karena itu, diperlukan pengolahan secara fisik-kimia untuk mengolah lindi stabil. Pengolahan lindi stabil dapat dilakukan dengan pengolahan secara fisik-kimia atau kombinasi proses fisik-kimia dengan proses pengolahan secara biologis. Dalam penelitian ini, proses pengolahan lindi dilakukan secara fisik-kimia dengan proses oksidasi elektrokimia atau biasa disebut dengan proses elektrooksidasi.

Proses elektrooksidasi merupakan proses oksidasi polutan organik di dalam sel elektrolit, yang dihasilkan dari dua elektroda yang terhubung dengan aliran listrik (Deng dan Englehardt, 2007). Lindi dari TPA Ngipik mengandung senyawa klorida yang tinggi, yaitu 1.400 mg L^{-1} . Kadar klorida yang tinggi pada lindi ini dapat menjadi keuntungan pada proses elektrooksidasi karena dapat memperkecil hambatan listrik, sehingga energi listrik yang dibutuhkan akan semakin rendah (Bagastyo *et al.*, 2014).

4.1.2 Penentuan Kerapatan Arus Optimum dan Waktu Operasi

Kerapatan arus merupakan perbandingan antara kuat arus dengan luasan elektroda yang digunakan. Rapat arus yang digunakan dalam penelitian pendahuluan ini adalah 50 mA cm^{-2} , 75 mA cm^{-2} , dan 100 mA cm^{-2} . Penentuan kerapatan arus optimum yang digunakan dalam penelitian utama ditentukan berdasarkan tingkat penyisihan COD dan warna asli lindi. Waktu operasi dalam penelitian pendahuluan ini adalah 6 jam dengan titik pengambilan sampel pada jam ke- 0, 2, 4 dan 6 jam. Parameter yang dianalisis selama penelitian pendahuluan meliputi pH, TDS, COD terlarut

dan intensitas warna lindi. Data hasil analisis COD dan intensitas warna lindi tertera pada Lampiran C Tabel LC.1 dan Tabel LC.2. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan massa COD pada waktu (t) terhadap massa COD awal [COD/COD₀] pada variasi kerapatan arus 50 mA cm⁻², 75 mA cm⁻², dan 100 mA cm⁻².

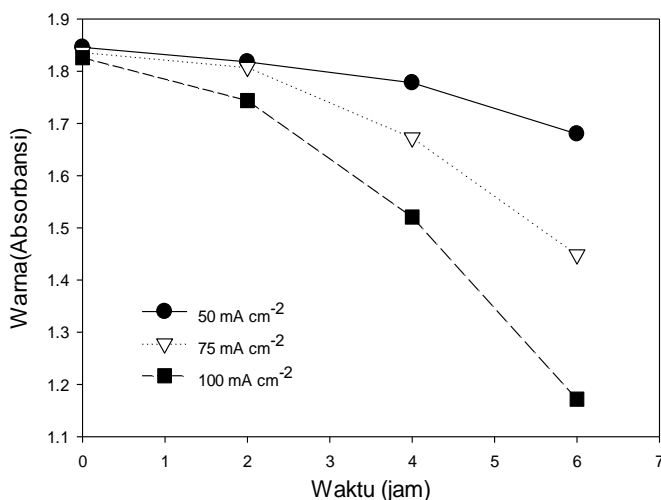


Gambar 4. 1 Penurunan COD [COD/COD₀] selama proses elektrooksidasi

Berdasarkan Gambar 4.1, pada proses elektrooksidasi dengan kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan 75 mA cm⁻², [COD/COD₀] mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu operasi, namun hal ini tidak terjadi pada penggunaan kerapatan arus 100 mA cm⁻². Pada jam ke-2 proses elektrooksidasi menggunakan kerapatan arus 100 mA cm⁻² nilai COD mengalami peningkatan, kemudian mengalami penurunan pada jam ke-4 dan jam ke-6. Hal ini dimungkinkan terjadi karena terbentuknya total klorin pada jam ke-2 yang mengakibatkan terganggunya pengukuran COD. Senyawa klorin dapat menyerupai senyawa organik selama pengukuran COD (Radjenovic *et al.*, 2011). Berdasarkan (Zhou *et al.*, 2016), peningkatan kerapatan arus dari 50 mA cm⁻² ke 100 mA cm⁻² pada pH 5,16 tidak menunjukkan

peningkatan yang signifikan. Penyisihan COD pada kerapatan arus tersebut berturut-turut adalah 0,66 g dan 0,68 g setelah 6 jam proses elektrooksidasi. Namun, pada penelitian ini setelah 6 jam proses elektrooksidasi, penyisihan COD pada pH 8,5 dengan kerapatan arus 50 mA cm^{-2} , 75 mA cm^{-2} , dan 100 mA cm^{-2} adalah sebesar 26,84% (0,43 g), 37% (0,53 g) dan 50,59% (0,72 g). Pada penelitian ini, peningkatan kerapatan arus dari 50 mA cm^{-2} ke 100 mA cm^{-2} mengalami peningkatan penyisihan COD.

Selain parameter COD, dalam penelitian pendahuluan ini juga dianalisis penurunan intensitas warna lindi (Gambar 4.2). Intensitas warna lindi diukur menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 420 nm.

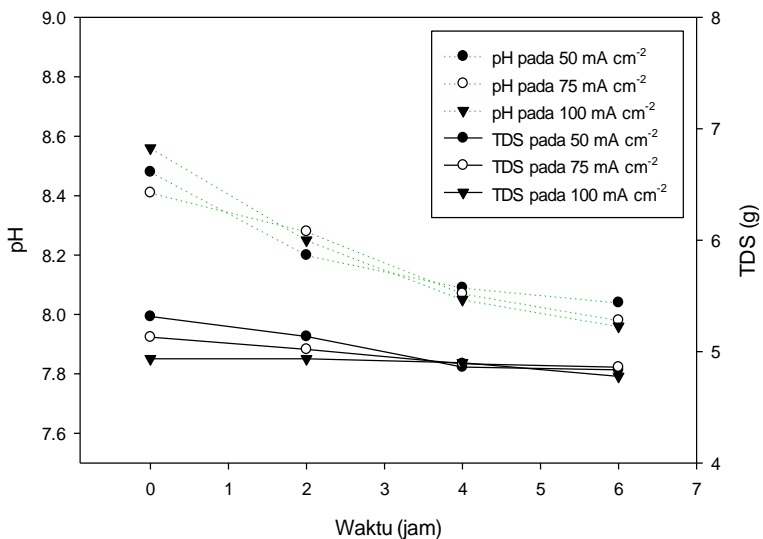


Gambar 4. 2 Penyisihan Warna Asli Lindi

Berdasarkan Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa pada proses elektrooksidasi intensitas warna lindi berkurang seiring dengan bertambahnya waktu operasi. Penyisihan warna pada kerapatan arus 50 mA cm^{-2} , 75 mA cm^{-2} dan 100 mA cm^{-2} setelah 6 jam waktu operasi berturut-turut adalah 8%, 21% dan 36%. Dalam penelitian ini, semakin besar kerapatan arus yang digunakan, penyisihan

warna asli lindi juga semakin besar. Menurunnya intensitas warna lindi ini dapat terjadi karena hilangnya senyawa organik penyebab warna selama proses elektrooksidasi.

Selain parameter COD dan intensitas warna lindi, juga dilakukan analisis parameter pH dan TDS. Data hasil analisis pH dan TDS pada penelitian pendahuluan tertera pada Lampiran C Tabel LC.3. Perubahan pH dan TDS selama penelitian pendahuluan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 pH dan Penyisihan Massa TDS

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa selama proses elektrooksidasi, pH operasi pada penggunaan kerapatan arus 50 mA cm⁻², 75 mA cm⁻², dan 100 mA cm⁻² mengalami sedikit penurunan, yaitu dari pH ±8,5 menjadi pH ±8 setelah 6 jam proses elektrooksidasi. Nilai pH yang semakin menurun ini terjadi karena pembentukan H⁺ pada anoda selama proses elektrooksidasi. Hal ini juga menunjukkan bahwa selama proses elektrooksidasi, proses oksidasi pada anoda lebih dominan terjadi dibandingkan

reaksi reduksi pada katoda. Disamping itu, massa TDS selama 6 jam proses elektooksidasi ini juga mengalami sedikit penurunan, yaitu hanya 9% (0,48 g), 5,2% (0,27 g) dan 3,2% (0,16 g) untuk penggunaan kerapatan arus 50 mA cm⁻², 75 mA cm⁻², dan 100 mA cm⁻². Penurunan massa TDS yang kecil dalam penelitian ini kemungkinan terjadi karena selama proses elektooksidasi proses yang dominan terjadi adalah proses oksidasi senyawa organik dibandingkan dengan oksidasi dan reduksi ion-ion lainnya. Hal ini juga dapat diakibatkan karena dalam penelitian ini proses elektooksidasi dilakukan menggunakan reaktor 1 kompartemen, dimana anoda dan katoda terletak di dalam kompartemen yang sama. Hal ini dapat menyebabkan ion-ion yang telah mengalami oksidasi kemudian mengalami reduksi kembali menjadi bentuk ion semula.

Dari hasil penelitian pendahuluan, dapat disimpulkan bahwa tingkat penyisihan COD dan warna yang paling besar terjadi pada kerapatan arus 100 mA cm⁻², namun pada proses elektooksidasi dengan kerapatan arus tersebut lapisan anoda BDD yang digunakan mengalami *detachment* atau pelepasan lapisan BDD. Dengan mempertimbangkan ketahanan dari anoda BDD, kerapatan arus 100 cm⁻² tidak dipilih untuk penelitian utama.

Apabila dibandingkan antara tingkat penyisihan COD dan warna lindi pada proses elektooksidasi dengan kerapatan arus 50 cm⁻² dan 75 cm⁻², penyisihan COD dan warna lindi setelah 6 jam waktu operasi yang paling besar dicapai pada penggunaan kerapatan arus 75 cm⁻². Penyisihan massa COD setelah 6 jam waktu operasi pada kerapatan arus 50 mA cm⁻² dan 75 mA cm⁻² adalah 26,84% dan 37%, sedangkan untuk penyisihan warna asli lindi adalah 8% dan 21%. Maka dalam penelitian ini kerapatan arus yang digunakan pada penelitian utama adalah 75 mA cm⁻². Waktu operasi dalam penelitian utama menjadi 7 jam untuk meningkatkan penyisihan bahan organik.

4.2 Penelitian Utama

Anoda BDD merupakan anoda yang memiliki potensi oksidasi yang tinggi. Anoda ini dapat mengaktivasi ion-ion di dalam lindi senyawa radikal anorganik seperti: klorida (Cl[•], Cl₂^{•-}), karbonat (CO₃^{•-}), fosfat (H₂PO₄[•], PO₄^{•2}) dan sulfat (SO₄^{•-}) yang dapat

meningkatkan laju oksidasi (Farhat *et al.*, 2017). Tujuan dari penelitian utama adalah menganalisis pengaruh penambahan ion pendukung untuk menghasilkan *active species* (dalam penelitian ini SO_4^{2-} dan Cl^-) serta pengaruh pH awal proses terhadap efisiensi proses elektrooksidasi pada lindi menggunakan anoda BDD. Variasi pada penelitian utama adalah variasi pH awal proses dan penambahan ion pendukung. Variasi pH awal proses terdiri dari pH 3, pH 5 dan pH 8,5 (pH asli lindi). Variasi penambahan ion pendukung terdiri dari penambahan 0,05 M NaCl, penambahan 0,05 M Na_2SO_4 , dan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 . Efisiensi dari proses elektrooksidasi dengan variasi pH awal proses dan penambahan ion pendukung tersebut dilihat berdasarkan tingkat penyisihan COD, Ammonium dan konsumsi energi spesifik. Penurunan nilai COD dan ammonium dinyatakan dalam normalisasi massa (Ct/Co), yaitu massa pada waktu (t) dibandingkan dengan massa awal. Pada grafik, sumbu y adalah (Ct/Co) dan sumbu x merupakan muatan listrik spesifik (Ah L^{-1}) selama proses elektrooksidasi. Muatan listrik spesifik merupakan hubungan antara kuat arus, waktu dan jumlah lindi yang dikelola selama proses elektrooksidasi. Rumus perhitungan muatan listrik spesifik dapat dilihat pada Persamaan 28. Kerapatan arus yang digunakan dalam penelitian utama ini adalah 75 mA cm^{-2} , dimana kuat arus yang digunakan adalah 0,6 A dan luasan elektroda yang digunakan adalah 8 cm^2 .

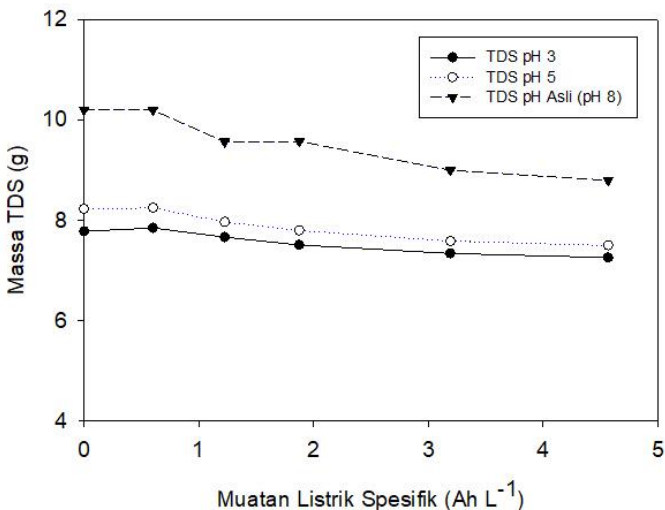
4.2.1 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektrooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Berdasarkan Li *et al.* (2001), tingkat penyisihan COD meningkat pada konsentrasi ion klorida antara 2.500 mg L^{-1} hingga 5.000 mg L^{-1} . Penambahan ion klorida ini dapat meningkatkan proses elektrooksidasi lindi melalui proses oksidasi tidak langsung oleh klorin/hipoklorit yang dihasilkan. Penambahan klorida dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisis apakah penambahan ion klorida dalam bentuk NaCl sebanyak 0,05 M dapat meningkatkan proses oksidasi senyawa organik dan ammonium.

Dalam penelitian ini, proses elektrooksidasi dilakukan dengan penambahan 0,05 M NaCl pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Nilai klorida yang terkandung dalam lindi asli terbilang cukup tinggi, yaitu 1.500 mg L⁻¹. Konsentrasi sulfat di dalam lindi cukup rendah jika dibandingkan dengan konsentrasi klorida yang terdapat di dalam lindi. Rata-rata perbandingan mol antara Cl⁻ dan SO₄²⁻ dalam variasi ini adalah 221:1.

4.2.1.1 Penurunan Massa TDS

TDS yang terukur dalam lindi menunjukkan kandungan zat-zat organik dan anorganik di dalam lindi tersebut. Penambahan NaCl dan penambahan asam mengakibatkan TDS pada lindi meningkat. Data hasil analisis massa TDS tertera pada Lampiran C Tabel LC.4. Gambar 4.4 menunjukkan penurunan massa TDS pada variasi pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M NaCl.

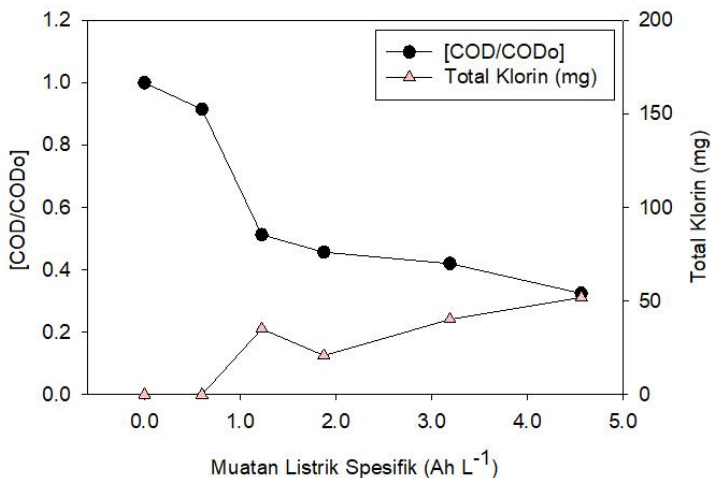


Gambar 4. 4 Penurunan TDS pada Variasi Penambahan 0,05 M NaCl

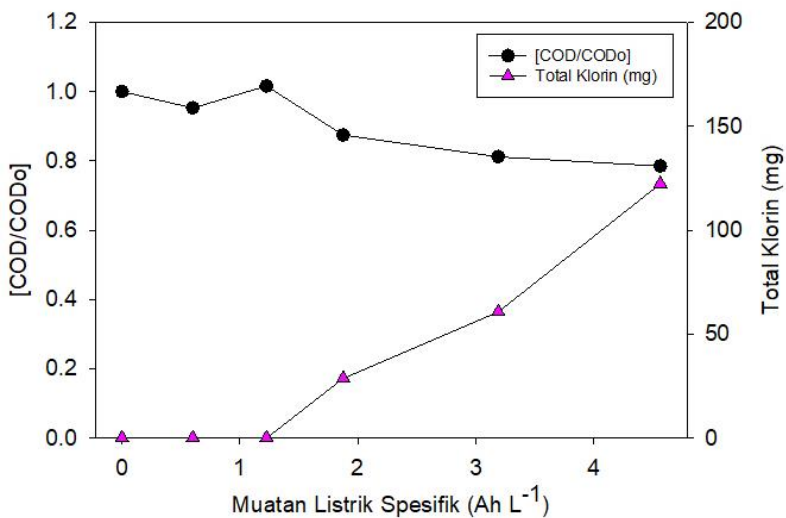
Penyisihan TDS pada variasi pH awal proses 3, pH 5 dan pH asli lindi adalah 0,52 g, 0,7 g dan 1,4 g. Nilai TDS selama proses elektrooksidasi relatif tetap. Hal ini kemungkinan terjadi karena pada saat proses elektrooksidasi, ion yang telah mengalami oksidasi kembali mengalami reduksi karena menggunakan reaktor 1 kompartemen (anoda dan katoda terletak pada kompartemen yang sama).

4.2.1.2 Penurunan nilai COD

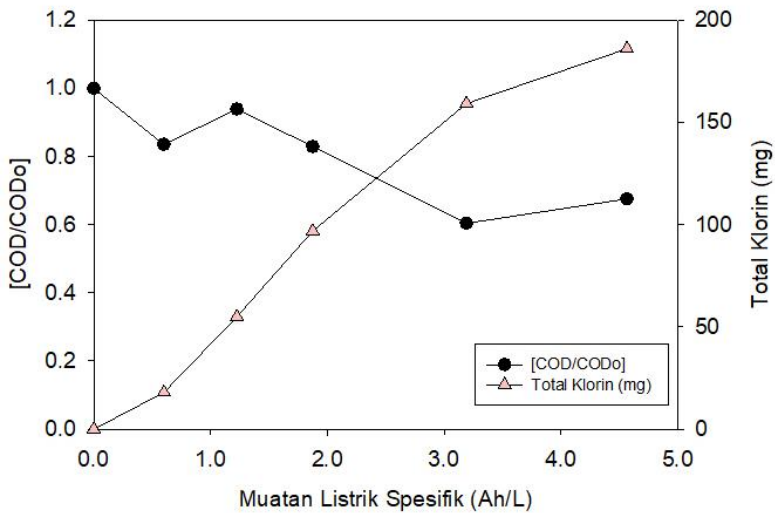
Oksidasi elektrokimia terdiri dari dua proses, yaitu proses oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung. Pada proses oksidasi langsung, senyawa organik (terukur sebagai COD) dikonversi menjadi senyawa yang lebih sederhana, sedangkan pada proses oksidasi tidak langsung senyawa organik mengalami proses mineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O . *Chemical Oxygen Demand* (COD) menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mendegradasi polutan organik. Pengukuran COD memiliki tingkat interferensi yang tinggi, terutama kaitannya dengan ion klorida. Dalam penelitian ini, nilai COD diuji dengan metode *closed reflux colorimetric*. Dalam penelitian ini juga dilakukan analisis terhadap pembentukan total klorin. Pengujian total klorin dilakukan dengan menggunakan reagen Dietil Parafenilen Diamin (DPD). Pengujian total klorin dilakukan karena kemungkinan adanya total klorin yang terukur sebagai COD selama analisis. Berdasarkan Radjenovic *et al* (2011), Senyawa klorin dapat menyerupai senyawa organik dan turut mengalami proses oksidasi selama pengukuran. Data hasil analisis COD dan Total Klorin tertera pada Lampiran C Tabel LC.5 hingga Tabel LC.7. Penurunan nilai COD dan pembentukan total klorin (Cl_2) dengan variasi penambahan 0,05 M NaCl pada pH awal proses 3, pH 5 dan pH asli lindi dapat dilihat pada Gambar 4.5 hingga Gambar 4.7. Penurunan nilai COD dinyatakan dalam rasio massa COD pada waktu (t) dengan massa COD pada awal proses. Nilai $[\text{COD}/\text{COD}_0]$ juga menunjukkan persentase nilai COD yang tersisa selama proses elektrooksidasi langsung.



Gambar 4. 5 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl



Gambar 4. 6 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl



Gambar 4. 7 Penurunan nilai COD pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl

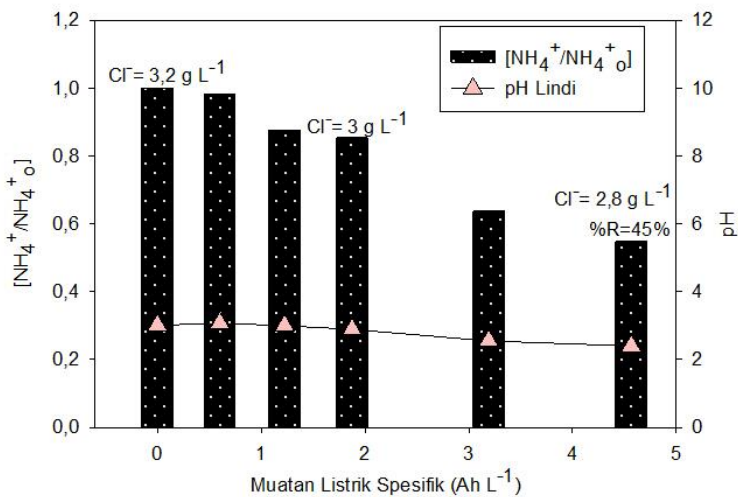
Pada variasi pH awal proses pH 5, saat muatan listrik spesifik 1,22 Ah L⁻¹ atau pada saat jam ke-2 proses elektrooksidasi, nilai COD mengalami peningkatan, lalu mengalami penurunan pada jam ke-3 hingga akhir waktu operasi. Peningkatan nilai COD ini juga terjadi pada pH awal proses= pH asli lindi. Pada jam ke-2 proses elektrooksidasi, nilai COD mengalami peningkatan, lalu mengalami penurunan pada jam ke-3 dan jam ke-5, kemudian sedikit meningkat pada akhir proses elektrooksidasi. Hal ini dapat terjadi karena terganggunya pengukuran COD akibat total klorin yang terbentuk selama proses elektrooksidasi. Setelah 7 jam waktu operasi elektrooksidasi, penyisihan COD pada variasi pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M NaCl adalah sebesar 1,19 g (68%), 0,582 g (38%) dan 0,48 g (27%). Dari hasil analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa pada variasi penambahan 0,05 M NaCl, tingkat penyisihan paling tinggi dicapai ketika pH awal proses adalah pH 3, kemudian diikuti oleh pH asli lindi (pH 8,56) dan pH 5. Penyisihan COD pada lindi yang tidak ditambahkan bahan kimia adalah 37%. Penyisihan COD

dengan penambahan 0,05 M NaCl pada pH 3 menunjukkan penyisihan COD hampir 2 kali lipat dibandingkan dengan lindi yang tidak ditambahkan bahan kimia. Sedangkan pada pH awal proses adalah pH 5, tingkat penyisihan COD hampir sama dengan tingkat penyisihan pada proses tanpa ditambahkan bahan kimia. Namun, pada variasi pH asli lindi tingkat penyisihan COD lebih kecil dibandingkan dengan proses elektrooksidasi tanpa ditambahkan bahan kimia. Berdasarkan grafik persenyawaan klorin pada Gambar 2.3, produk klorin yang dominan antara pH 3 adalah Cl_2 , pada $\text{pH} < 7,5$ adalah HClO , sedangkan pada $\text{pH} > 7,5$ produk klorin yang dominan adalah OCl^- . Dalam penelitian ini, penyisihan COD pada pH 3 lebih tinggi dibandingkan dengan penyisihan COD pada pH 5 dan pH Asli lindi. Hal ini dapat terjadi karena pada pH 3 produk klorin yang dominan adalah Cl_2 , dimana tingkat oksidasi Cl_2 ini lebih tinggi dibandingkan dengan HClO dan OCl^- .

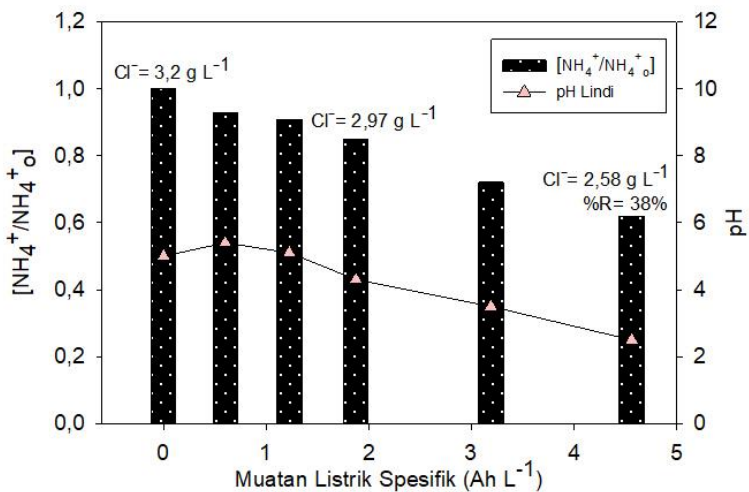
Pada proses elektrooksidasi dengan penambahan 0,05 M NaCl dengan variasi pH awal proses, pembentukan total klorin setelah 7 jam proses elektrooksidasi semakin tinggi seiring dengan peningkatan nilai pH. Pembentukan total klorin setelah 7 jam proses elektrooksidasi adalah 52 mg; 122,3 mg; dan 186,08 mg pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Apabila dibandingkan antara penyisihan COD dengan proses pembentukan klorin, kemungkinan terjadi kompetisi antara oksidasi senyawa organik dan oksidasi senyawa klorin selama proses elektrooksidasi berlangsung.

4.2.1.3 Penurunan Ammonium

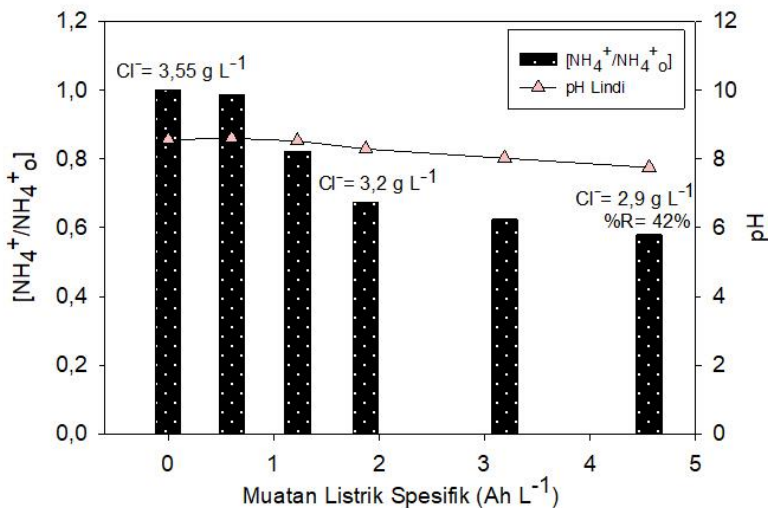
Pada penelitian ini, ammonium diukur dengan metode nessler menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 390 nm. Penyisihan ammonium menjadi salah satu pertimbangan untuk menentukan efisiensi proses elektrooksidasi pada lindi. Data hasil analisis penyisihan Ammonium tertera pada Lampiran C Tabel LC.8 hingga Tabel. LC. 10. Penyisihan massa Ammonium dengan penambahan NaCl pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dapat dilihat pada Gambar 4.8 hingga Gambar 4.10.



Gambar 4. 8 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl

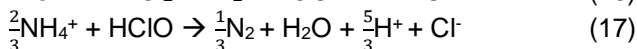
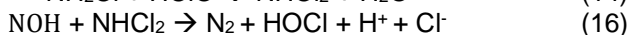
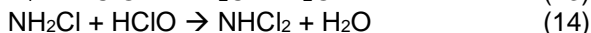
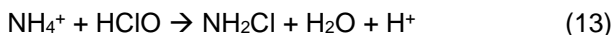


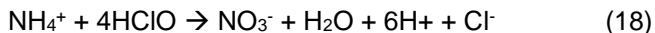
Gambar 4. 9 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl



Gambar 4. 10 Penurunan nilai Ammonium Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Penyisihan ammonium pada variasi pH awal proses 3 dan pH 5 dengan penambahan 0,05 M NaCl setelah 7 jam proses elektrooksidasi adalah sebesar 0,176 g (45%) dan 0,221 g (38%). Sedangkan pada pH awal = pH asli lindi, penyisihan massa ammonium lebih tinggi dibandingkan pada pH awal proses pH 3 dan pH 5, yaitu sebesar 0,244 gram (42%). Berdasarkan Anglada *et al.* (2011), penyisihan ammonium selama proses elektrooksidasi sangat bergantung pada peranan oksidasi langsung oleh klorin dan hipoklorit. Proses penyisihan ammonium oleh hipoklorit terjadi melalui reaksi 13-16 yang mirip dengan reaksi “Breakpoint” atau secara langsung oleh Hipoklorit (persamaan 17 dan 18) (Mandal *et al.*, 2017).





Berdasarkan Mandal *et al.* (2017), penyisihan ammonium sangat bergantung pada peranan oksidasi tidak langsung oleh klorin aktif. Keberadaan *active species* ini sangat tergantung pada pH lindi selama proses elektooksidasi.

Disamping itu, klorida juga mengalami penurunan selama proses elektooksidasi. Penyisihan massa klorida pada variasi pH awal proses 3, pH 5 dan pH asli lindi adalah 0,624 g, 0,625 g dan 0,652 g setelah 7 jam proses elektooksidasi. Penurunan massa klorida ini terjadi akibat proses oksidasi ion klorida menjadi senyawa klorin atau hipoklorit yang kemudian terukur sebagai total klorin. Reaksi oksidasi ion klorida tersebut seperti yang tertera pada persamaan 2 dan 3. Senyawa klorin dan hipoklorit inilah yang kemudian berperan dalam proses oksidasi senyawa organik dan ammonium.



Selama proses elektooksidasi pada variasi pH awal proses adalah pH 3 dan pH asli lindi, pH operasi cenderung tetap pada 2 jam pertama, dan mengalami sedikit penurunan selama 5 jam setelahnya. Sedangkan, pada pH awal proses adalah pH 5, pada jam pertama, pH mengalami kenaikan dari pH 5 menjadi pH 5,4 kemudian turun menjadi pH 2,5 setelah 7 jam proses elektooksidasi. Penurunan nilai pH ini menunjukkan bahwa proses oksidasi pada anoda lebih dominan dibandingkan dengan proses reduksi pada katoda. Proses oksidasi pada anoda menghasilkan senyawa H^+ (persamaan 3) sedangkan proses reduksi pada katoda menghasilkan senyawa OH^- (persamaan 7).

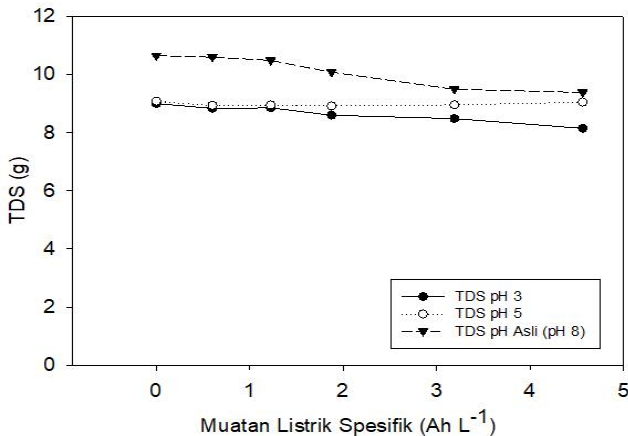
4.2.2 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4

Variasi penambahan ion pendukung yang kedua adalah penambahan ion SO_4^{2-} . Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap proses elektooksidasi dengan penambahan 0,05 M

Na_2SO_4 pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Nilai konsentrasi SO_4^{2-} awal pada variasi pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi berturut turut adalah 929 mg L^{-1} , 903 mg L^{-1} dan 900 mg L^{-1} . Pada variasi ini, rata-rata perbandingan mol antara ion klorida dan ion sulfat adalah 4:1.

4.2.2.1 Penurunan Massa TDS

Data hasil analisis penurunan massa TDS tertera pada Lampiran C Tabel LC.11. Gambar 4.11 berikut menunjukkan penurunan massa TDS pada variasi pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$.

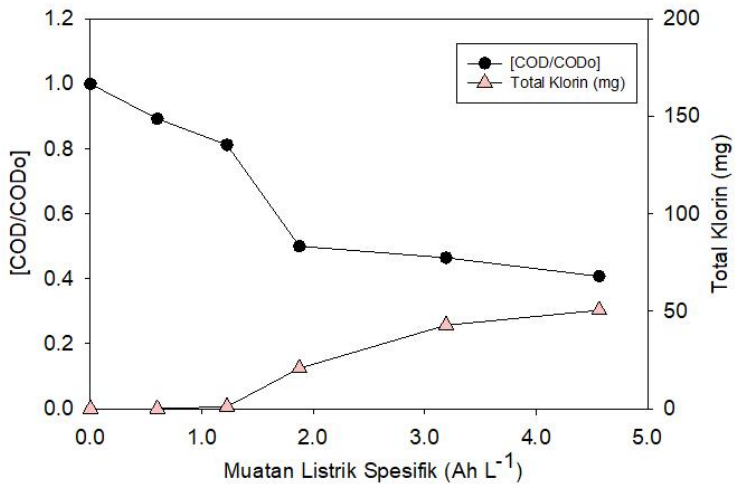


Gambar 4. 11 Penyisihan Massa TDS dan Massa Klorida pada Variasi Penambahan $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$

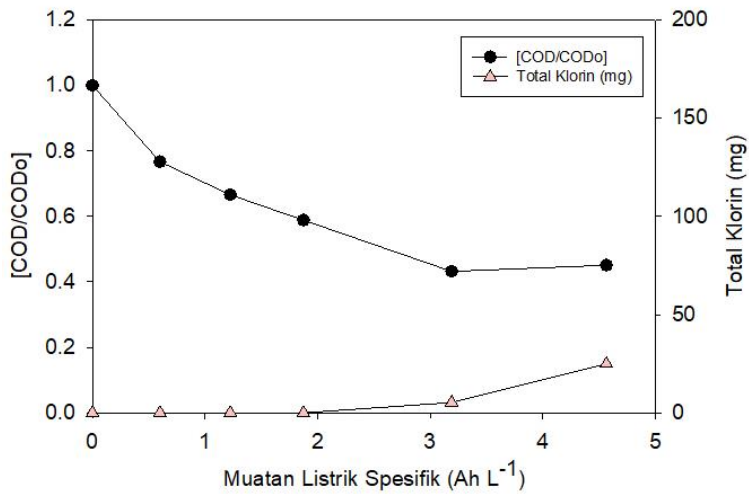
Pada Gambar 4.11, dapat dilihat bahwa massa TDS selama proses elektrooksidasi pada pH 3 dan pH asli lindi mengalami sedikit penurunan, namun pada pH 5, massa TDS cenderung tetap selama 7 jam proses elektrooksidasi. Penyisihan massa TDS pada variasi pH awal proses 3 dan pH asli lindi dengan penambahan $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ adalah $0,85 \text{ g}$ dan $1,266 \text{ g}$.

4.2.2.2 Penurunan nilai COD

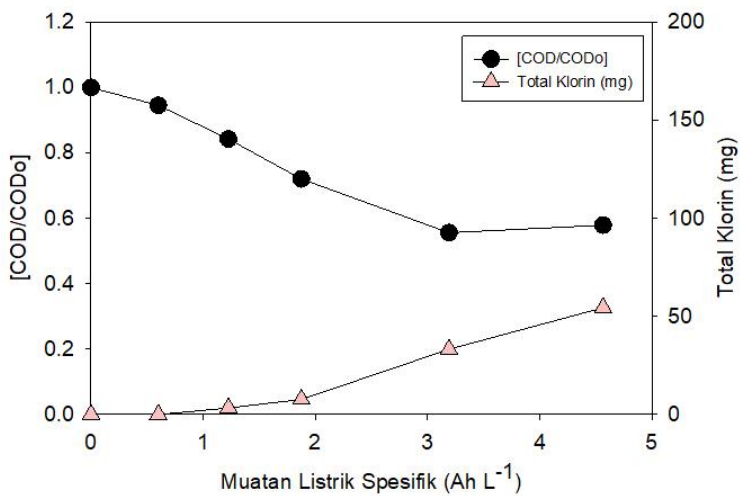
Penurunan nilai COD dan pembentukan total klorin dengan variasi penambahan 0,05 M Na_2SO_4 pada pH awal proses= pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dapat dilihat pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.14. Data hasil analisis COD dan Total Klorin tertera pada Lampiran C Tabel LC.12 hingga Tabel LC.14.



Gambar 4. 12 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4



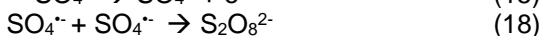
Gambar 4. 13 Penurunan nilai COD pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4



Gambar 4. 14 Massa COD pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na_2SO_4

Pada variasi pH awal 3, nilai COD mengalami penurunan sebesar 50% setelah 3 jam proses elektrooksidasi, kemudian penyisihan COD mulai stagnan setelah 3 jam pertama. Sedangkan, pada variasi pH awal proses adalah pH 5 dan pH asli lindi, COD mengalami penurunan pada 5 jam proses elektrooksidasi, kemudian mengalami sedikit peningkatan pada jam ke-7 proses elektrooksidasi. Penyisihan massa COD pada variasi pH awal proses 3, pH 5, dan pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M Na₂SO₄ berturut-turut adalah 1,01 g (59%), 0,89 g (55%) dan 0,73 g (42%) setelah 7 jam waktu operasi. Dengan penambahan 0,05 M Na₂SO₄, tingkat penyisihan COD tertinggi dicapai pada pH awal proses adalah pH 3, kemudian disusul dengan pH 5 dan yang paling rendah adalah pada pH asli lindi. Apabila dibandingkan dengan penyisihan COD pada proses tanpa penambahan bahan kimia, penyisihan COD pada pH 3 dan pH 5 menunjukkan tingkat penyisihan COD 1,5x lipat lebih besar. Berdasarkan Farhat *et al.* (2017), keberadaan senyawa sulfat dalam proses elektrooksidasi dapat mengakibatkan terjadinya aktivasi sulfat menjadi radikal sulfat, dimana senyawa tersebut dapat meningkatkan laju penyisihan senyawa *refractory*. Tingginya angka penyisihan COD pada variasi penambahan Na₂SO₄ ini dapat terjadi akibat proses oksidasi tidak langsung oleh radikal sulfat dan radikal hidroksida yang terbentuk selama proses elektrooksidasi. Kedua senyawa tersebut merupakan oksidator kuat yang dapat mengoksidasi senyawa *refractory* yang terdapat pada lindi. Setelah 7 jam proses elektrooksidasi, konsentrasi sulfat yang terdapat pada lindi mengalami penurunan.

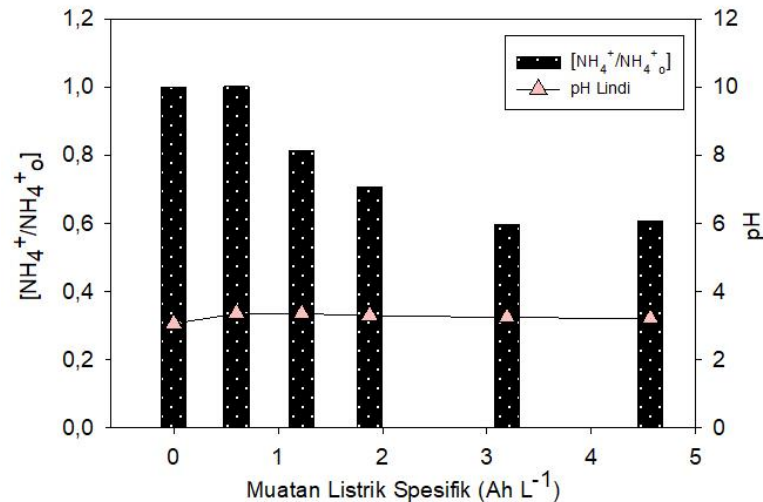
Kandungan sulfat akhir proses elektrooksidasi pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi berturut-turut adalah 914 mg L⁻¹, 868,3 mg L⁻¹ dan 860 mg L⁻¹. Berdasarkan Farhat *et al.* (2017), pada proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD ion sulfat dapat membentuk radikal sulfat (persamaan 15) dan peroksodisulfat (persamaan 18). Kedua senyawa tersebut merupakan oksidator kuat yang dapat meningkatkan laju proses elektrooksidasi.



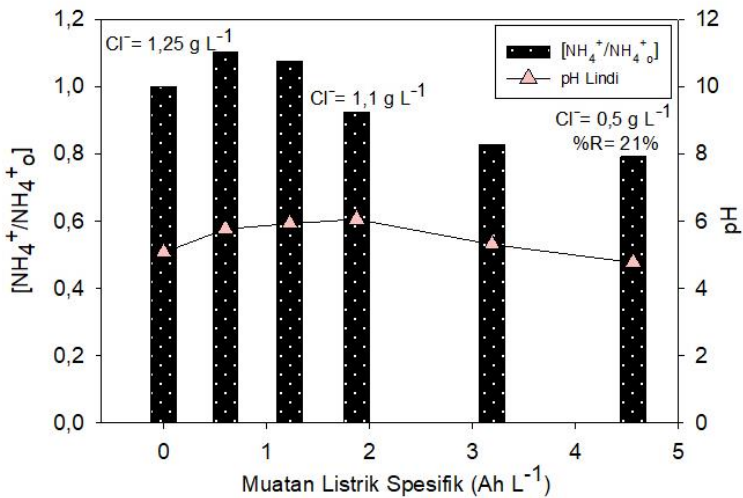
Total klorin yang terbentuk pada akhir proses elektrooksidasi pada variasi pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi pada penambahan 0,05 M Na₂SO₄ adalah 50,5 mg, 24,88 mg dan 50,1 mg. Apabila dibandingkan antara penambahan Na₂SO₄ dengan penambahan NaCl pada pH awal 5 dan pH asli lindi, saat pembentukan total klorin lebih besar tingkat penyisihan COD lebih kecil. Sebaliknya, saat pembentukan klorin kecil lebih kecil, tingkat penyisihan COD menjadi lebih besar. Hal ini kemungkinan terjadi karena adanya kompetisi antara proses oksidasi senyawa organik (persamaan 1 dan 11) dan senyawa klorin (persamaan 2 dan 3) selama proses elektrooksidasi.

4.2.2.3 Penurunan nilai Ammonium

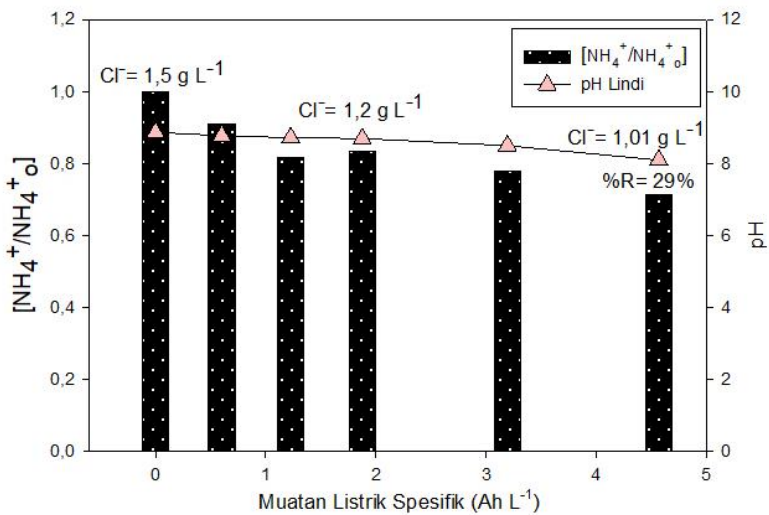
Data hasil analisis penyisihan ammonium pada variasi pH awal proses dengan penambahan Na₂SO₄ tertera pada Lampiran C Tabel LC. 15 hingga LC.17. Grafik 4.15 hingga 4.17 berikut menunjukkan penyisihan ammonium pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M Na₂SO₄.



Gambar 4. 15 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄



Gambar 4. 16 Penurunan nilai Ammonium pada Variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄



Gambar 4. 17 Penurunan Nilai Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Pada proses elektooksidasi dengan variasi pH awal proses adalah pH 3 dan pH 5 serta penambahan 0,05 M Na_2SO_4 , nilai ammonium meningkat pada jam pertama, kemudian menurun selama 6 jam setelahnya. Sedangkan, pada variasi pH awal proses adalah pH asli lindi, nilai ammonium mengalami penurunan pada 2 jam pertama, kemudian meningkat pada jam ke-3, dan kembali mengalami penurunan pada jam ke-5 dan jam ke-7. Fluktuasi pada nilai ammonium ini kemungkinan terjadi karena berubahnya ammonium menjadi bentuk senyawa yang lain selama proses elektooksidasi sehingga tidak terukur pada saat dilakukan uji ammonium. Penyisihan ammonium pada variasi pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M Na_2SO_4 setelah 7 jam proses elektooksidasi berturut-turut adalah 0,194 g (36%), 0,09 g (21%) dan 0,121 g (29%). Penyisihan Ammonium pada pH asli lindi lebih rendah dibandingkan pada pH 3, namun lebih tinggi dibandingkan pH 5. Jika dibandingkan dengan penyisihan ammonium pada variasi penambahan NaCl, penambahan Na_2SO_4 menghasilkan penyisihan ammonium yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan penyisihan ammonium sangat erat kaitannya dengan klorin dan hipoklorit yang terbentuk selama proses elektooksidasi (Mandal *et al.*, 2017). Pada variasi penambahan NaCl, klorin dan hipoklorit yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan tanpa penambahan NaCl namun ditambahkan Na_2SO_4 .

Disamping penyisihan massa COD, ammonium dan TDS, massa klorida juga mengalami penurunan selama proses elektooksidasi. Setelah 7 jam proses elektooksidasi, penyisihan massa klorida pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi berturut-turut adalah 0,49 g (33%), 0,74 g (60%) dan 0,39 g (27%). Penurunan massa klorida ini terjadi karena proses oksidasi senyawa tersebut menjadi senyawa aktif klorin dan kloramin.

4.2.3 Pengaruh pH Awal Proses terhadap Proses Elektooksidasi pada Lindi dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4

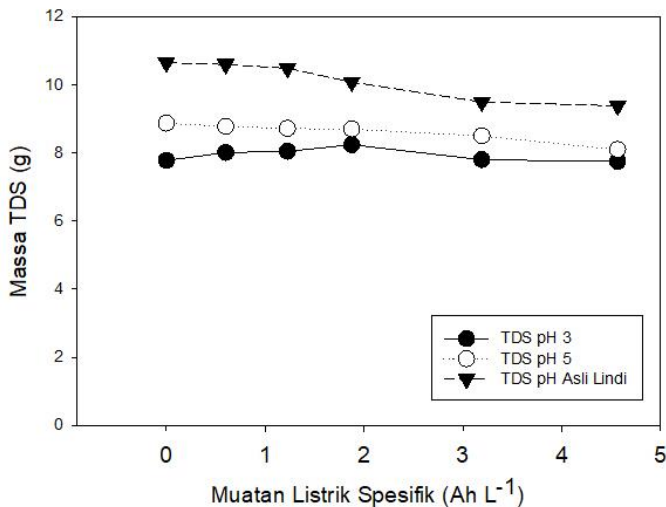
Variasi penambahan ion pendukung yang ketiga adalah penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 . Konsentrasi sulfat awal pada pH awal proses pH 3, pH 5 dan pH asli lindi berturut

turut adalah 347 mg L^{-1} , 332 mg L^{-1} dan 367 mg L^{-1} . Sedangkan konsentrasi klorida berturut-turut adalah 2550 mg L^{-1} , 2250 mg L^{-1} , dan 2500 mg L^{-1} . Rata-rata perbandingan mol antara ion klorida dan ion sulfat dalam variasi ini adalah 19:1.

4.2.3.1 Penurunan Massa TDS

Data hasil analisis penyisihan massa TDS dan Klorida tertera pada Lampiran C Tabel LC. 18. Penurunan massa TDS dan Klorida pada variasi pH dengan penambahan $0,025 \text{ M NaCl} + 0,025 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ dapat dilihat pada Gambar 4.19.

Seperti yang terjadi pada variasi penambahan $0,05 \text{ M NaCl}$ dan $0,05 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$, pada penambahan $0,025 \text{ M NaCl} + 0,025 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ dengan variasi pH awal proses adalah pH 3, pH 5 dan pH asli lindi nilai penyisihan TDS sangat kecil. Penyisihan TDS pada pH awal proses 5 dan pH asli lindi adalah sebesar $0,03 \text{ g}$, $0,77 \text{ g}$ dan $1,266 \text{ g}$.

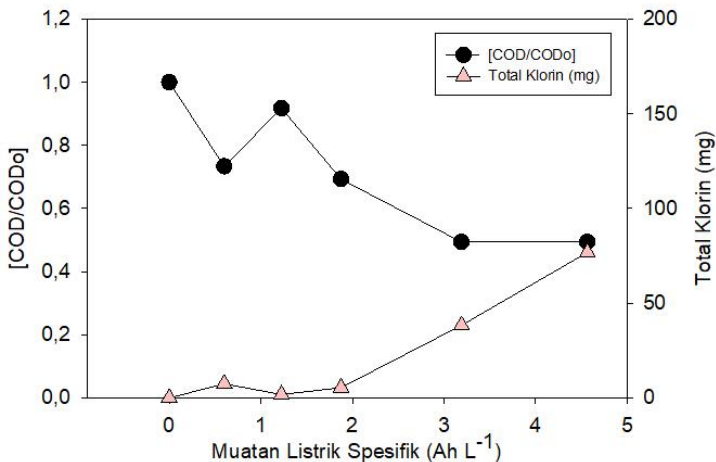


Gambar 4. 18 Penurunan Massa TDS pada Variasi Penambahan $0,025 \text{ M NaCl} + 0,025 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$

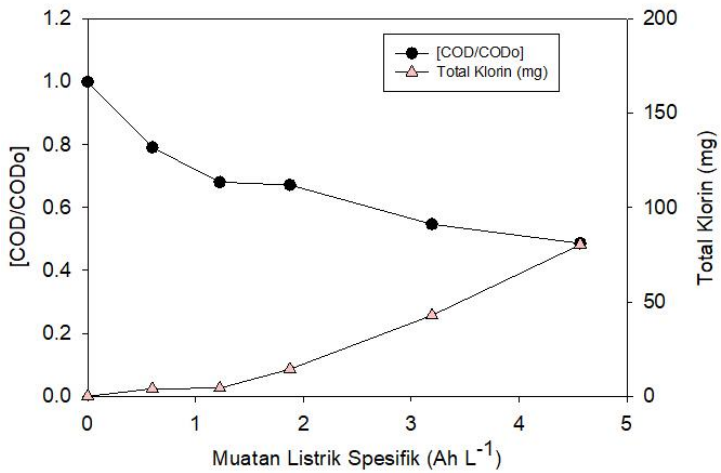
Dari hasil penelitian yang diperoleh pada setiap variasi, dapat disimpulkan bahwa proses elektrooksidasi ini kurang efektif untuk menyisihkan nilai TDS yang terdapat pada lindi. Hal ini kemungkinan terjadi karena anoda dan katoda terletak pada kompartemen yang sama. Keberadaan anoda dan katoda pada kompartemen yang sama ini dapat menyebabkan ion-ion yang sebelumnya telah mengalami oksidasi, kembali mengalami reduksi menjadi ion semula.

4.2.3.2 Penurunan nilai COD

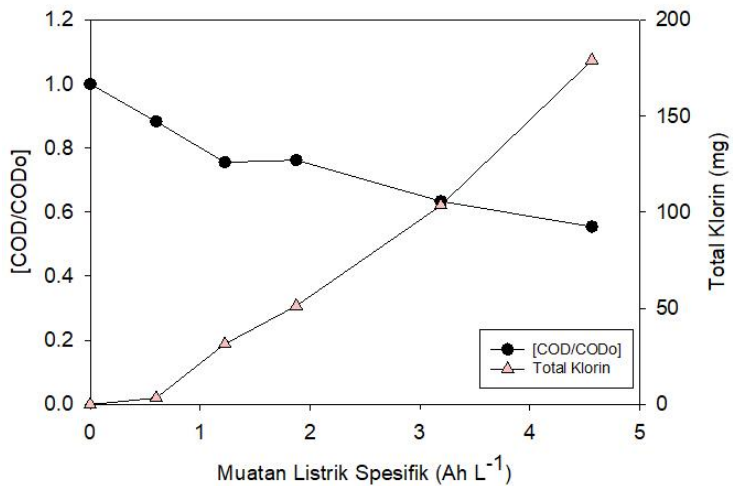
Penurunan nilai COD dengan variasi penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ pada pH awal proses 3, pH 5 dan pH asli lindi dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20. Data hasil analisis COD dan Total Klorin tertera pada Lampiran C Tabel LC.19 dan LC.20.



Gambar 4. 19 Penurunan Nilai COD pada pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄



Gambar 4. 20 Penurunan Nilai COD pada pH 5 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4



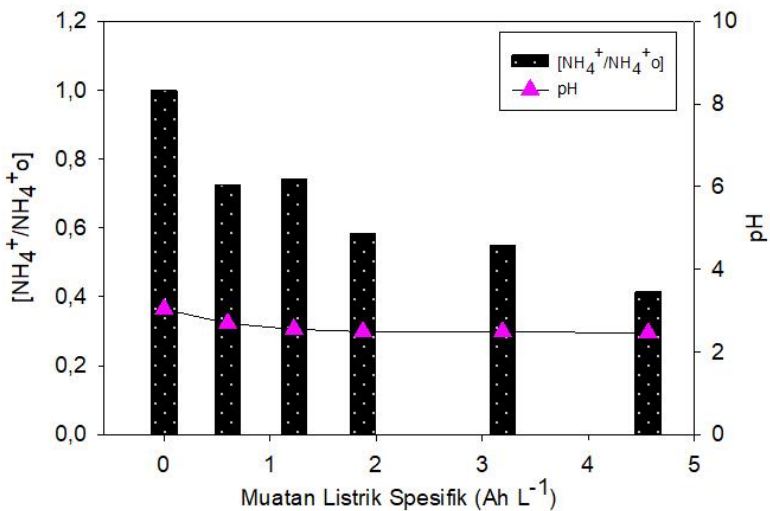
Gambar 4. 21 Penurunan Nilai COD pada pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4

Pada variasi pH awal proses adalah pH 5, nilai COD mengalami penurunan selama 7 jam proses elektooksidasi. Namun, pada variasi pH awal proses adalah pH asli lindi, nilai COD mengalami penurunan selama 2 jam pertama, kemudian sedikit meningkat pada jam ke-3, lalu mengalami penurunan kembali pada jam ke-5 dan jam ke-7. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pengukuran COD memiliki interfensi yang tinggi, terutama kaitannya dengan keberadaan klorida yang tinggi. Penyisihan massa COD pada pH awal proses adalah pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ adalah 0,73 g (51%), 0,72 g (49%) dan 0,73 g (45%). Pada variasi ini, penyisihan COD cenderung sama pada setiap variasi pH.

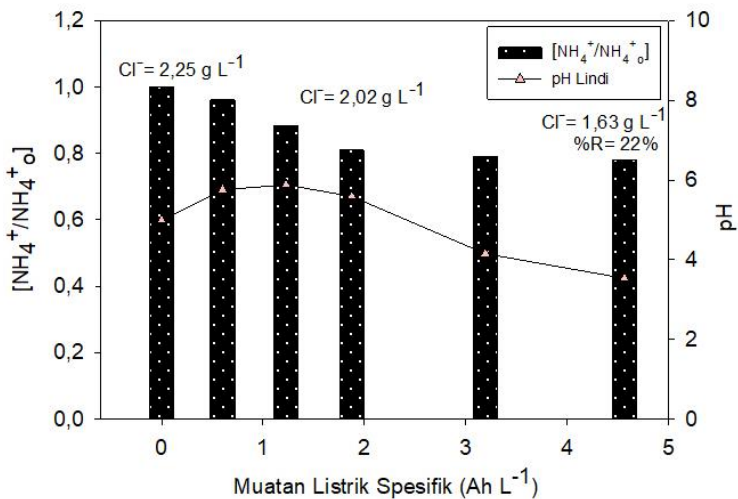
Total klorin yang terbentuk setelah 7 jam proses elektooksidasi pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi adalah 103,4 mg, 80,3 mg dan 165 mg. Sama seperti pada variasi penambahan 0,05 M NaCl dan penambahan 0,05 M Na₂SO₄, total klorin yang terbentuk setelah 7 jam proses elektooksidasi pada pH asli lindi lebih tinggi dibandingkan dengan pH 3 dan pH 5. Dari keseluruhan hasil penelitian, semakin tinggi nilai klorida yang terdapat pada lindi, maka senyawa klorin yang dihasilkanpun semakin tinggi.

4.2.3.3 Penurunan nilai Ammonium

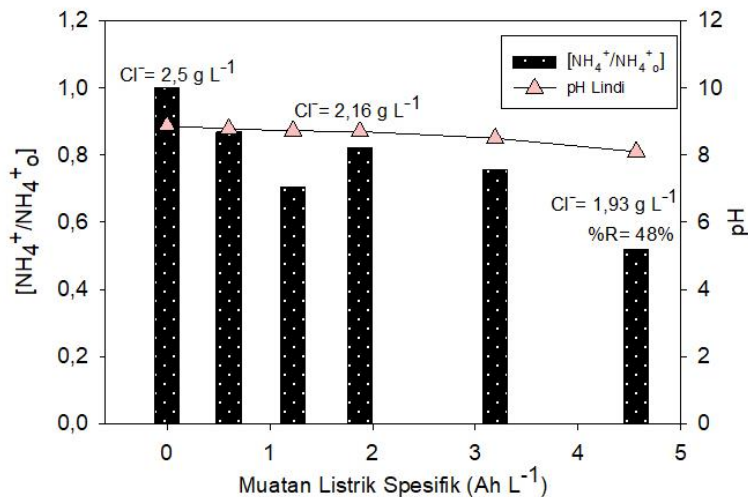
Data hasil analisis penyisihan ammonium dan pH tertera pada Lampiran C Tabel LC.21 dan LC.22. Penurunan massa ammonium pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ dapat dilihat pada Gambar 4.22 hingga 4.24.



Gambar 4. 22 Penurunan Nilai Ammonium pada pH 3 dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄



Gambar 4. 23 Penurunan Nilai Ammonium pada pH 5 dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄



Gambar 4. 24 Penurunan Nilai Ammonium pada pH Asli Lindi dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Pada variasi pH awal proses adalah pH 5, massa ammonium mengalami penurunan selama 7 jam proses elektooksidasi, namun pada variasi pH awal proses adalah pH asli lindi, massa ammonium menurun pada 2 jam pertama, lalu mengalami peningkatan pada jam ke-3, dan kembali mengalami penurunan pada jam ke-5 dan jam ke-7. Penyisihan massa ammonium pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi setelah 7 jam proses elektooksidasi dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ adalah 0,205 g (59%), 0,08 g (22%) dan 0,215 g (48%). Penyisihan ammonium pada variasi penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ lebih besar dibandingkan dengan penambahan 0,05 M Na₂SO₄, namun lebih kecil dibandingkan dengan penambahan 0,05 M NaCl. Hal ini menunjukkan pentingnya peranan senyawa klorin dalam proses penyisihan ammonium.

Disamping penurunan nilai COD, ammonium dan TDS, massa klorida juga mengalami penyisihan selama proses elektooksidasi. Penyisihan massa klorida ini karena terjadinya proses oksidasi senyawa klorida menjadi senyawa klorin dan hipoklorit yang

berperan sebagai agen pengoksidasi zat organik dan ammonium pada proses oksidasi tidak langsung. Setelah 7 jam proses elektrooksidasi, penyisihan massa klorida pada pH awal proses pH 5 dan pH asli lindi berturut-turut adalah 0,53 g (21%), 0,62 g (28%) dan 0,567 g (23%). Selama proses elektrooksidasi, konsentrasi sulfat cenderung tetap selama proses. Konsentrasi sulfat pada akhir proses elektrooksidasi adalah 347 mg L⁻¹, 326 mg L⁻¹, 332,3 mg L⁻¹.

Pada pH awal proses adalah pH 5, pada 2 jam pertama proses elektrooksidasi pH operasi mengalami kenaikan dari pH 5 menjadi pH 5,88, kemudian pH mengalami penurunan hingga pH 3,53 setelah 7 jam proses elektrooksidasi. Sedangkan pada pH awal proses adalah pH 3 dan pH asli lindi, pH operasi mengalami penurunan yaitu dari pH 3,04 menjadi 2,46 dan dari pH 8,87 menjadi pH 8,1 setelah 7 jam proses elektrooksidasi.

4.3 Perubahan Biodegradabilitas Lindi (BOD₅/COD)

Biochemical Oxygen Demand (BOD) merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk mendekomposisikan senyawa organik. Pada penelitian ini dilakukan analisis BOD₅ awal dan akhir proses elektrooksidasi untuk mengetahui perubahan biodegradabilitas (BOD₅/COD) lindi. Perubahan nilai BOD₅/COD dapat dilihat pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.10.

Tabel 4. 2 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	625,000	1680,000	325,000	1058,333	0,372
4,570	300,000	621,667			0,483

Tabel 4. 3 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	625,000	1588,333	325,000	233,333	0,393
4,570	300,000	1355,000			0,221

Tabel 4. 4 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	725,000	1763,333	508,333	366,667	0,411
4,570	216,667	1396,667			0,155

Tabel 4. 5 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	500,000	1705,000	340,000	950,000	0,293
4,570	160,000	755,000			0,212

Tabel 4. 6 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	475,000	1625,833	350,000	829,167	0,292
4,570	125,000	796,667			0,157

Tabel 4. 7 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	650,000	1755,000	475,000	650,000	0,370
4,570	175,000	1105,000			0,158

Tabel 4. 8 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 3 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	625,000	1438,333	401,500	666,667	0,435
4,570	223,500	771,667			0,290

Tabel 4. 9 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH 5 dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	450,000	1471,667	337,500	650,000	0,306
4,570	112,500	821,667			0,137

Tabel 4. 10 Perubahan Nilai BOD/COD pada variasi pH Asli dengan Penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Δ BOD ₅ (mg L ⁻¹)	Δ COD (mg L ⁻¹)	BOD ₅ /COD
0,000	625,000	1638,333	487,500	650,000	0,381
4,570	137,500	988,333			0,139

Dari Tabel 4.2 hingga Tabel 4.10 terlihat bahwa secara keseluruhan nilai BOD₅ mengalami penurunan. Sedangkan nilai BOD₅/COD seluruh variasi mengalami penurunan kecuali pada variasi penambahan 0,05 M NaCl pada pH 3. Pada variasi penambahan 0,05 M NaCl pada pH 3, nilai BOD₅/COD sedikit mengalami kenaikan. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses elektooksidasi dalam penelitian ini tidak dapat meningkatkan nilai biodegradabilitas lindi. Di dalam penelitian lain, Sari (2017) melakukan penelitian mengenai proses elektooksidasi menggunakan anoda karbon dan katoda *stainless steel*. Dalam penelitian tersebut, nilai BOD₅/COD mengalami peningkatan, sehingga nilai biodegradabilitas lindi meningkat. Hal ini berarti bahwa dalam penelitian tersebut proses yang dominan terjadi adalah konversi senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Sedangkan dalam penelitian ini kemungkinan proses yang terjadi adalah mineralisasi senyawa organik menjadi CO₂ dan H₂O.

4.4 Mineralisasi Zat Organik Selama Proses Elektooksidasi

Pada proses elektooksidasi, senyawa organik dapat mengalami *electrochemical conversion* dan *electrochemical combustion* atau mineralisasi. *Electrochemical conversion* merupakan proses degradasi senyawa organik menjadi senyawa yang lebih

sederhana. Sedangkan pada *electrochemical combustion* senyawa organik mengalami pembakaran dan termineralisasi menjadi CO_2 dan H_2O . Untuk mengetahui seberapa besar mineralisasi senyawa organik akibat proses elektooksidasi, di dalam penelitian ini dilakukan uji Total Organic Carbon (TOC). TOC merupakan jumlah karbon yang terikat dalam suatu senyawa organik. Perubahan nilai TOC dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Perubahan nilai TOC

Variasi	TOC (mg/L)		Massa tersisihkan (mg)	% Removal
	Awal	Akhir		
0,05 M NaCl pH 3	686,4	553	133,4	19%
0,05 M NaCl pH 5	772,5	600,5	172	22%
0,05 M NaCl pH Asli	790	662	128	16%
0,05 Na_2SO_4 pH 3	558,25	383,25	175	31%
0,05 Na_2SO_4 pH 5	609	448,1	160,9	26%
0,05 Na_2SO_4 pH Asli	725,5	516,8	208,7	29%
0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 pH 3	548,7	390,2	158,5	29%
0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 pH 5	617,4	454,2	163,2	26%
0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 pH Asli	686,4	503,1	183,3	27%

Dari data hasil analisis tersebut, rata-rata penyisihan TOC terbesar dicapai pada penambahan 0,05 M Na_2SO_4 , kemudian pada penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 , dan yang terkecil pada penambahan 0,05 M NaCl. Berdasarkan Farhat *et al.* (2017), tingkat penyisihan TOC pada Na_2SO_4 *anolyte* menurun seiring dengan penambahan ion klorida. Hal ini terjadi karena perusakan sulfat radikal oleh ion klorida menjadi senyawa radikal klorida (persamaan 23), dimana senyawa radikal klorida ini memiliki potensi oksidasi yang lebih rendah dibandingkan dengan senyawa radikal sulfat.

Pada variasi penambahan Na_2SO_4 dan $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$, massa TOC yang tersisihkan pada pH asli lindi lebih besar dibandingkan pada pH 3 dan pH 5. Sedangkan penyisihan COD lebih besar pada pH 3 dibandingkan pada pH 5 dan pH asli lindi. Berdasarkan De Laat *et al.* (2004), distribusi radikal hidroksida: radikal klorida adalah 1:99 pada pH asam, sedangkan pada pH >6, distribusi radikal hidroksida: radikal hipoklorat adalah 90:10. Agen pengoksidasi yang kurang reaktif dominan pada pH asam. Walaupun menghasilkan penyisihan COD yang lebih tinggi namun kurang mampu untuk melepaskan ikatan dibandingkan dengan radikal hidroksida. Sedangkan pada proses mineralisasi untuk penyisihan TOC lebih bergantung pada peran radikal hidroksida dan agen pengoksidasi lainnya seperti peroksodisulfat dan peroksodikarbonat (Zhu *et al.*, 2008).

Dari hasil penelitian, pada variasi penambahan NaCl pada pH 3 tingkat penyisihan COD cukup tinggi yaitu 68%, namun penyisihan TOC hanya 19%. Hal ini mengindikasikan terjadinya pembentukan senyawa organoklorin yang tidak terukur sebagai COD. Berdasarkan Farhat *et al.* (2017), salah satu kelemahan proses elektrooksidasi adalah terbentuknya senyawa toksik organik terklorinasi dan anorganik terklorinasi. Oksidasi Cl^- pada anoda dapat menghasilkan senyawa klorin yang reaktif seperti Cl_2 dan HOCl , yang dapat bereaksi dengan cepat dengan ikatan tidak jenuh dan senyawa yang kaya elektron membentuk senyawa organik yang terklorinasi. Sebagai tambahan, keberadaan senyawa klorida juga dapat membentuk senyawa toksik klorat dan perklorat pada penggunaan kuat arus yang tinggi yang digunakan pada proses elektrooksidasi pada anoda BDD.

4.5 Konsumsi Energi Spesifik Proses Elektrooksidasi

Kelayakan dari proses elektrokimia dapat dievaluasi berdasarkan konsumsi energi spesifik proses. Perhitungan konsumsi energi spesifik proses dilakukan untuk parameter COD dan ammonium dengan membandingkan antara massa yang tersisihkan dengan muatan listrik spesifik. Konsumsi energi spesifik pada parameter COD dan ammonium dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan 4.3.

Tabel 4. 12 Konsumsi Energi Spesifik parameter COD

Variasi	Muatan Listrik Spesifik (Wh L ⁻¹)	% R COD	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik (g Wh ⁻¹)
Kontrol	42,192	37%	0,5278	0,0125
0,05 M NaCl pH 3	36,68	68%	1,1914	0,0325
0,05 M NaCl pH 5	36,68	34%	0,5817	0,0159
0,05 M NaCl pH Asli	34,23	27%	0,4784	0,0140
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 3	36,54	59%	1,0104	0,0277
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 5	34,23	55%	0,8929	0,0261
0,05 Na ₂ SO ₄ pH Asli	34,51	42%	0,7384	0,0214
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 3	35	51%	0,7284	0,0208
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 5	34,93	51%	0,7157	0,0205
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH Asli	36,26	45%	0,7291	0,0201

Berdasarkan Tabel 4.12, konsumsi energi spesifik (g Wh⁻¹) seluruh variasi penambahan bahan kimia lebih besar dibandingkan dengan kontrol (tanpa penambahan bahan kimia). Penyisihan massa COD terbesar terjadi pada variasi penambahan 0,05 M NaCl pada pH 3, yaitu sebesar 1,1914 g (0,0325 g Wh⁻¹), lalu diikuti oleh penambahan 0,05 M Na₂SO₄ pada pH 3 yaitu sebesar 1,0104 g (0,0277 g Wh⁻¹).

Pada variasi penambahan NaCl dan penambahan Na₂SO₄, penyisihan COD tinggi pada pH awal proses adalah pH 3, namun mengalami penurunan pada pH 5 dan pH asli lindi. Namun, pada variasi penambahan NaCl+ Na₂SO₄, massa COD yang tersisihkan cenderung sama pada variasi pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Dari

hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa pada variasi penambahan NaCl+Na₂SO₄ (perbandingan mol klorida: sulfat adalah 19:1) dapat diaplikasikan pada rentang pH yang cukup luas (pH 3 hingga pH 8,5).

Tabel 4. 13 Konsumsi Energi Spesifik Parameter Ammonium

Variasi	Muatan Listrik Spesifik (Wh L ⁻¹)	% R NH ₄ ⁺	Massa tersisihkan (g)	Konsumsi energi spesifik (g Wh ⁻¹)
0,05 M NaCl pH 3	36.68	45%	0,176	0,005
0,05 M NaCl pH 5	36.68	38%	0,221	0,006
0,05 M NaCl pH Asli	34.23	42%	0,245	0,007
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 3	36.54	39%	0,195	0,005
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 5	34.23	21%	0,090	0,003
0,05 Na ₂ SO ₄ pH Asli	34.51	29%	0,122	0,004
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 3	35	59%	0,201	0,006
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 5	34.93	22%	0,088	0,003
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH Asli	36.26	48%	0,215	0,006

Berdasarkan Tabel 4.3, penyisihan massa ammonium terbesar terjadi pada pH asli lindi dengan penambahan 0,05 M NaCl yaitu 0,245 g (0,007 g/Wh), lalu diikuti oleh variasi pada asli lindi dengan penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na₂SO₄ yaitu sebesar 0,215 g (0,006 g/Wh). Tingginya penyisihan ammonium pada pH asli lindi

terjadi karena pada pH 8 ammonium mulai berubah menjadi gas ammonia (Deborde and von Gunten, 2008).

4.6 Laju Penyisihan COD dan Ammonium

Dalam penelitian ini, juga dilakukan perhitungan mengenai laju penyisihan COD dan ammonium. Laju penyisihan COD dan ammonium ini merupakan perbandingan antara banyaknya senyawa yang tersisihkan (dalam satu mol) per waktu. Laju penyisihan COD dan ammonium dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 4. 14 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan NaCl

Waktu	Laju penyisihan COD (mol jam ⁻¹)			Laju penyisihan Ammonium (mol jam ⁻¹)		
	pH 3	pH 5	pH Asli	pH 3	pH 5	pH Asli
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,002	0,003	0,005	0,000	0,002	0,000
2	0,022	0,002	-0,006	0,002	0,001	0,005
3	0,003	0,004	0,007	0,001	0,002	0,005
5	0,001	0,002	0,007	0,002	0,002	0,001
7	0,003	0,004	-0,002	0,001	0,002	0,001
Rata-rata	0,005	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002

Tabel 4. 15 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan Na₂SO₄

Waktu	Laju penyisihan COD (mol jam ⁻¹)			Laju penyisihan Ammonium (mol jam ⁻¹)		
	pH 3	pH 5	pH Asli	pH 3	pH 5	pH Asli
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,006	0,012	0,003	0,000	-0,002	0,002
2	0,004	0,005	0,006	0,005	0,001	0,002
3	0,017	0,004	0,007	0,003	0,004	0,000
5	0,001	0,004	0,005	0,002	0,001	0,001
7	0,002	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001
Rata-rata	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001

Tabel 4. 16 Laju Penyisihan COD dan Ammonium pada Variasi Penambahan NaCl+Na₂SO₄

Waktu	Laju penyisihan COD (mol jam ⁻¹)			Laju penyisihan Ammonium (mol jam ⁻¹)		
	pH 3	pH 5	pH Asli	pH 3	pH 5	pH Asli
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,012	0,008	0,006	0,005	0,001	0,003
2	-0,008	0,005	0,007	0,000	0,002	0,004
3	0,010	0,000	0,000	0,003	0,002	-0,003
5	0,004	0,003	0,003	0,000	0,000	0,001
7	0,000	0,001	0,002	0,001	0,000	0,003
Rata-rata	0,003	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001

Dari Tabel 4.14 hingga Tabel 4.16 tersebut dapat disimpulkan bahwa pada variasi penambahan NaCl, Na₂SO₄ maupun NaCl+Na₂SO₄ menunjukkan laju penyisihan COD yang lebih besar dibandingkan dengan penyisihan ammonium. Berdasarkan Cabeza *et al.* (2007), laju penyisihan ammonium lebih lambat dibandingkan dengan laju penyisihan COD. Ketika penyisihan COD mendekati 100%, laju penyisihan ammonium meningkat. Seperti yang telah dijelaskan oleh Deng dan Englehardt, (2007) bahwa terjadi kompetisi antara proses penyisihan ammonium dengan penyisihan COD, dimana penyisihan ammonium sangat bergantung pada proses elektrooksidasi tidak langsung oleh klorin/hipoklorit sedangkan penyisihan COD sangat bergantung pada proses oksidasi langsung dan oksidasi oleh radikal hidroksida.

4.7 *Instantaneous Current Efficiency (ICE)*

Instantaneous current efficiency (ICE) menunjukkan seberapa besar kuat arus yang digunakan untuk proses oksidasi senyawa organik maupun ion-ion anorganik. Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan terhadap nilai ICE untuk parameter COD dan Cl₂. Tabel 4.17 berikut merupakan nilai ICE untuk parameter Cl₂ dan

COD setelah 7 jam proses elektrooksidasi atau pada muatan listrik 4,57 Ah L⁻¹.

Tabel 4. 17 ICE COD dan Cl₂ setelah 7 jam proses elektrooksidasi

Variasi	ICE Cl ₂	ICE COD
0,05 M NaCl pH 3	0,93%	88%
0,05 M NaCl pH 5	2,20%	46%
0,05 M NaCl pH Asli	3,35%	38%
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 3	0,91%	81%
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 5	0,45%	71%
0,05 Na ₂ SO ₄ pH Asli	0,90%	59%
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 3	1,86%	58%
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 5	1,44%	57%
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH Asli	1,29%	58%

Dari Tabel 4.17 terlihat bahwa nilai ICE untuk Cl₂ adalah sebesar 0,45% hingga 3,35%. Sedangkan nilai ICE untuk COD adalah sebesar 38% hingga 88% untuk seluruh variasi. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kuat arus lebih dominan digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik dibandingkan dengan senyawa klorin.

4.8 Aplikasi Proses Elektrooksidasi pada Pengolahan Lindi

Pada setiap variasi pengolahan, konsentrasi organik pada akhir proses elektrooksidasi belum memenuhi baku mutu sehingga masih berbahaya untuk dibuang langsung ke badan air. Nilai TDS akhir proses elektrooksidasi juga masih tinggi, hal ini terjadi karena anoda dan katoda terletak dalam satu kompartemen. Optimasi pengolahan dengan proses elektrooksidasi ini dapat dilakukan dengan menambah waktu operasi, memperluas permukaan elektroda dan penggunaan membran.

Setelah 7 jam proses elektrooksidasi pada setiap parameter, nilai TDS cenderung tetap atau mengalami sedikit penurunan sehingga

proses masih dapat dilanjutkan. Nilai TDS ini sangat berpengaruh terhadap kemampuan larutan untuk menghantarkan listrik. Semakin tinggi nilai TDS, maka Daya Hantar Listrik (DHL) juga semakin tinggi.

Cabeza *et al.* (2007) melakukan penelitian mengenai pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi menggunakan anoda BDD. Variasi pertama dari penelitian ini adalah kerapatan arus dan konsentrasi dari COD (3500, 1800 dan 850 mg/L) dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (2000, 1000 dan 500 mg/L) dimana penyisihan COD dan $\text{NH}_4^+\text{-N}$ mendekati 100% setelah 6-8 jam. Luasan elektroda yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah 70 cm². Dalam penelitian ini, luasan elektroda yang digunakan adalah 8 cm² dan tingkat penyisihan tertinggi yang dicapai adalah 68%, yaitu pada variasi pH awal proses 3 dengan penambahan 0,05 NaCl. Namun, salah satu kelemahan proses elektrooksidasi dengan keberadaan senyawa klorida yang tinggi adalah terbentuknya senyawa organik terklorinasi dan senyawa anorganik terklorinasi (Farhat *et al.*, 2017).

Berdasarkan Sari (2017), kombinasi dari proses elektrooksidasi dan elektrodialisis dengan penggunaan membran dapat menyisihkan TDS mendekati 100%. Selain dapat menyisihkan TDS dengan efisiensi yang sangat tinggi, penggunaan membran juga dapat merecovery ammonium dan fosfat yang terdapat di dalam lindi. Ammonium dan fosfat yang telah di recovery ini kemudian dapat digunakan kembali sebagai bahan pembuatan pupuk.

Pada setiap variasi proses elektrooksidasi, nilai biodegradabilitas lindi (BOD_5/COD) cenderung mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan proses yang dominan terjadi selama elektrooksidasi adalah mineralisasi senyawa organik menjadi CO_2 dan H_2O dibandingkan dengan proses konversi senyawa organik menjadi senyawa yang lebih sederhana (terukur sebagai BOD). Nilai (BOD_5/COD) yang kecil ini masih belum memenuhi persyaratan pengolahan biologis, sehingga proses ini kurang cocok untuk dijadikan sebagai pre treatment sebelum pengolahan biologis. Sebagian besar pengolahan lindi di Indonesia menggunakan

pengolahan biologis. Di TPA Ngipik Gresik pengolahan lindi menggunakan sistem ABR dan wetland. Apabila proses elektooksidasi ini diterapkan sebagai pendukung teknologi yang sudah ada, maka proses ini kemungkinan lebih cocok digunakan sebagai *post treatment* setelah pengolahan ABR, lalu dilanjutkan dengan wetland (Lampiran D). Pengolahan biologis dengan ABR dapat menurunkan nilai TSS dengan efisiensi yang cukup tinggi. Hal ini dapat menjadi keuntungan untuk proses elektooksidasi karena nilai TSS yang tinggi yang terkandung di dalam lindi dapat mengganggu proses elektooksidasi. Berdasarkan Mandal *et al.* (2017), proses elektooksidasi lebih baik digunakan sebagai post-treatment jika kandungan organik yang terdapat pada influen begitu tinggi. Pada beberapa hasil penelitian, pengaplikasian proses biologis sebagai post-treatment dapat membantu mengurangi konsumsi energi dan biaya pengolahan. Proses elektooksidasi dapat digunakan sebagai post-treatment untuk menghilangkan senyawa *recalcitrant* yang terdapat pada lindi agar buangnya memenuhi baku mutu yang berlaku. Proses elektooksidasi ini juga dapat menurunkan zat penyebab warna pada lindi, dimana salah satu kelemahan dari proses wetland adalah kurang efisien dalam menurunkan zat penyebab warna pada lindi. Namun, wetland juga sebaiknya tetap digunakan dalam pengolahan lindi karena sistem wetland ini memiliki kemampuan untuk menyerap sisa nutrisi yang belum dapat diolah pada sistem ABR dan proses elektooksidasi.

Berdasarkan tingkat penyisihan COD dan konsumsi energi spesifik proses, pada variasi penambahan 0,05 M NaCl ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}= 221:1$) dan variasi penambahan 0,05 M Na_2SO_4 ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}= 4:1$) yang efektif adalah pada pH 3. Sedangkan dengan penambahan 0,025 NaCl+ 0,025 M Na_2SO_4 ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}= 19:1$), pada setiap variasi pH penyisihan COD dan konsumsi energi menunjukkan hasil yang cenderung sama. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat $\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}= 19:1$, proses ini dapat diaplikasikan pada rentang pH yang luas, yaitu pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi (pH 8,5). Hal ini dapat menjadi keuntungan karena pH lindi di TPA juga mengalami penurunan lalu selama masa transisi hingga masa acidogenesis, lalu mengalami peningkatan

dari masa acidogenesis hingga masa maturasi (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Pada variasi pH awal proses adalah pH 3 dan pH 5, pada akhir proses elektooksidasi pH menjadi $\pm 2,5$ dan ± 4 . Nilai pH tersebut tidak memenuhi baku mutu lindi yaitu antara 6-9. Sedangkan, pada proses elektooksidasi dengan pH awal proses adalah pH asli lindi $\pm 8,5$, nilai pH pada akhir proses elektooksidasi adalah sekitar 8. Maka penerapan proses elektooksidasi dengan pH awal proses adalah pH asli lindi akan lebih aman terhadap lingkungan.

Pada pH awal proses adalah pH asli lindi, penyisihan COD pada variasi penambahan NaCl, penambahan Na₂SO₄, dan penambahan NaCl+Na₂SO₄ berturut-turut adalah 27%, 42% dan 45%. Sedangkan penyisihan ammonium berturut-turut adalah 42%, 29% dan 48%. Dari hasil penelitian tersebut, variasi yang optimum untuk penyisihan COD dan ammonium adalah proses elektooksidasi dengan penambahan NaCl+Na₂SO₄.

Selanjutnya adalah analisis kebutuhan biaya proses elektooksidasi untuk setiap variasi. Biaya yang dibutuhkan untuk setiap variasi adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 18 Analisis Kebutuhan Bahan Kimia

Variasi	Penambahan Asam		Penambahan Ion pendukung		Kebutuhan Listrik (Wh L ⁻¹)
	Asam Nitrat (mL)	Natrium Nitrat (g)	Natrium sulfat (g)	Natrium Klorida (g)	
Kontrol	-	-	-	-	42,2
0,05 M NaCl pH 3	4,7	0	0	2,925	36,68
0,05 M NaCl pH 5	4,1	0,76	0	2,925	36,68
0,05 M NaCl pH Asli	0	5,76	0	2,925	34,23
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 3	4,7	0	7,1	0	36,54
0,05 Na ₂ SO ₄ pH 5	4,1	0,76	7,1	0	34,23
0,05 Na ₂ SO ₄ pH Asli	0	5,76	7,1	0	34,51

Variasi	Penambahan Asam		Penambahan Ion pendukung		Kebutuhan Listrik (Wh L ⁻¹)
	Asam Nitrat (mL)	Natrium Nitrat (g)	Natrium sulfat (g)	Natrium Klorida (g)	
0,025 M NaCl+0,025 M Na2SO4 pH 3	4,7	0	3,55	1,4625	35
0,025 M NaCl+0,025 M Na2SO4 pH 5	4,1	0,76	3,55	1,4625	34,93
0,025 M NaCl+0,025 M Na2SO4 pH Asli	0	5,76	3,55	1,4625	36,26

Tabel 4. 19 Harga Bahan Kimia

Bahan Kimia	Harga	Satuan
Asam Nitrat 65%	Rp 1.075.000,00	/liter
Natrium nitrat teknis	Rp 58.500,00	/Kg
Natrium sulfat teknis	Rp 39.000,00	/Kg
Natrium klorida teknis	Rp 58.500,00	/Kg
Harga Listrik/Kwh	Rp 1.467,28	/Kwh

Tabel 4. 20 Kebutuhan Biaya per Liter Lindi

Variasi	Adjust pH		Penambahan Ion pendukung		Harga Listrik	Harga Total
	Asam Nitrat (Rp)	Natrium Nitrat (Rp)	Natrium sulfat (Rp)	Natrium Klorida (Rp)		
Kontrol	-	-	-	-	Rp 61,92	Rp 61,92
0,05 M NaCl pH 3	5.053	-	-	171	Rp 53,82	Rp 5.277,43
0,05 M NaCl pH 5	4.408	44	-	171	Rp 53,82	Rp 4.676,89
0,05 M NaCl pH Asli	-	337	-	171	Rp 50,22	Rp 558,30
0,05 Na2SO4 pH 3	5.053	-	277	-	Rp 53,61	Rp 5.383,01
0,05 Na2SO4 pH 5	4.408	44	277	-	Rp 50,22	Rp 4.779,08

Variasi	Adjust pH		Penambahan Ion pendukung		Harga Listrik	Harga Total
	Asam Nitrat (Rp)	Natrium Nitrat (Rp)	Natrium sulfat (Rp)	Natrium Klorida (Rp)		
0,05 Na ₂ SO ₄ pH Asli	-	337	277	-	Rp 50,64	Rp 664,50
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 3	5.053	-	138	86	Rp 51,35	Rp 5.327,86
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH 5	4.408	44	138	86	Rp 51,25	Rp 4.727,22
0,025 M NaCl+0,025 M Na ₂ SO ₄ pH Asli	-	337	138	86	Rp 53,20	Rp 614,17

Berdasarkan data sekunder dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Gresik, debit lindi rata-rata TPA Ngipik Gresik adalah 172 m³/hari. Pada variasi pH awal proses adalah pH asli lindi, dengan biaya sebesar Rp 614,17 dapat menyisihkan 0,73 g COD atau Rp 841,328/g COD. Beban COD total TPA Ngipik/7 jam adalah sebagai berikut:

Beban COD= 172.000 L/hari x 2040 mg/L x 7 jam= 102.340 g.

Biaya untuk menyisihkan COD total

$$= 102.340 \times Rp\ 841,328 = Rp\ 86.101.586$$

Disamping itu, biaya pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi tanpa penambahan bahan kimia adalah Rp 61,92 dan dapat menyisihkan COD sebesar 0,5278 g. Biaya total yang diperlukan untuk penyisihan COD total tanpa penambahan kimia adalah

$$= \frac{102.340}{0,5278} \times Rp\ 61,92 = Rp\ 12.006.238,72$$

Dari hasil tersebut, proses elektrooksidasi dengan penambahan bahan kimia membutuhkan biaya 7 kali lipat dibandingkan dengan tanpa penggunaan bahan kimia. Berdasarkan Oloibiri (2016), pengolahan lindi dengan proses *Advanced Oxidation Process* (AOPs) dan Electrofenton membutuhkan biaya Rp 641,77/g COD dan Rp 41,92/g COD. Dalam penelitian ini proses elektrooksidasi

dengan menggunakan anoda BDD membutuhkan biaya operasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan biaya operasi pada proses AOPs dan Electrofenton. Untuk mengurangi biaya operasi dalam proses elektooksidasi ini dapat dilakukan dengan mengurangi penggunaan bahan kimia namun dengan menambahkan waktu operasi proses elektooksidasi.

Keunggulan dari proses elektooksidasi ini dalam mengolah lindi adalah dapat mengoksidasi senyawa *refractory* yang tidak dapat diolah secara biologis. Kombinasi proses pengolahan biologis dan elektooksidasi juga dapat meningkatkan efisiensi pengolahan lindi sehingga diharapkan dapat memenuhi baku mutu yang berlaku. Kombinasi kedua pengolahan juga dapat mengurangi konsumsi energi yang digunakan pada pengolahan elektooksidasi. Namun, salah satu kelemahan dari proses ini adalah biaya investasi yang mahal. Sedangkan untuk biaya operasi dapat dikurangi dengan mengoperasikan proses elektooksidasi tanpa penambahan bahan kimia dan memanfaatkan sumber energi yang dihasilkan dari TPA maupun energi matahari.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh pada penelitian ini yaitu:

Penambahan ion klorida dan sulfat sangat berperan untuk menghasilkan agen pengoksidasi yang berperan dalam proses oksidasi tidak langsung pada proses elektrooksidasi lindi. Sedangkan pH pada saat proses elektrooksidasi sangat berpengaruh pada bentuk persenyawaan agen pengoksidasi yang berperan pada proses elektrooksidasi tidak langsung. Pada variasi penambahan 0,05 M NaCl ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-} = 221:1$), penyisihan COD tertinggi pada pH awal proses pH 3 yaitu sebesar 1,1914 g ($0,0325 \text{ g Wh}^{-1}$) dan penyisihan ammonium terbesar pada pH asli lindi yaitu 0,245 g ($0,007 \text{ g Wh}^{-1}$). Sedangkan, pada variasi penambahan 0,05 M Na_2SO_4 ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-} = 4:1$) penyisihan COD dan ammonium terbesar pada pH awal proses= pH 3 yaitu sebesar 1,0104 g ($0,0277 \text{ g Wh}^{-1}$) dan 0,195 g ($0,05 \text{ g Wh}^{-1}$). Untuk penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-} = 19:1$), penyisihan ammonium dan COD terbesar dicapai pada pH asli lindi, yaitu 0,7291 g COD ($0,0208 \text{ g Wh}^{-1}$) dan 0,215 g Ammonium ($0,006 \text{ g Wh}^{-1} \text{ NH}_4^+$). Namun, pada penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 penyisihan COD menunjukkan hasil yang cenderung sama antara pada pH 3, pH 5 dan pH asli lindi. Hal ini menunjukkan bahwa pada variasi penambahan 0,025 M NaCl+0,025 M Na_2SO_4 ($\text{mol Cl}^-:\text{SO}_4^{2-} = 19:1$) dapat diaplikasikan pada rentang pH yang luas yaitu antara pH 3 hingga pH 8,5.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian mengenai pengolahan lindi dengan proses elektrooksidasi selanjutnya antara lain:

1. Dalam penelitian ini, nilai TDS pada akhir operasi masih tinggi. Penggunaan membran sangat disarankan karena dapat menyisihkan nilai TDS dengan efisiensi yang tinggi. Selain itu penggunaan membran ini juga dapat merecovery nutrisi yang terdapat pada lindi.

2. Kandungan klorida yang sangat tinggi di dalam lindi dapat menyebabkan terbentuknya senyawa organik terklorinasi selama proses elektrooksidasi, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut.
3. Melakukan penelitian mengenai proses elektrooksidasi sebagai post-treatment, karena dalam penelitian ini proses tidak dapat meningkatkan nilai biodegradabilitas lindi sehingga kurang cocok apabila digunakan sebagai pre-treatment.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, C. Y. (2015). Pengaruh tegangan listrik dan penambahan konsentrasi NaCl terhadap proses elektrolisis lindi. *Tugas Akhir Teknik Lingkungan FTSP ITS*.
- Afdal, A., Sari, R. N. 2017. Karakteristik lindi dari Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA) Air Dingin, Kota Padang, Sumatera Barat. *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya); Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya) 2016* DOI: 10.20961/ProsidingSnfa.V1i0.4490.
- Alvarez-Vazquez, H., Jefferson, B., Judd, S. 2004. Membrane bioreactors vs conventional biological treatment of landfill leachate: *A brief review* (Vol. 79).
- Amokrane, A., Comel, C., Veron, J. 1997. Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research*, 31(11), 2775–2782.
- Anglada, Á., Urtiaga, A., Ortiz, I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications (Vol. 84).
- Anglada, Á., Urtiaga, A., Ortiz, I., Mantzavinos, D., Diamadopoulos, E. 2011. Boron-doped diamond anodic treatment of landfill leachate: Evaluation of operating variables and formation of oxidation by-products. *Water Research*, 45(2), 828–838.
- Aziz, H. A., Adlan, M. N., Mohamed Zahari, M. S., Alias, S. 2004. Removal of ammoniacal nitrogen (NH_3) from municipal solid waste leachate by using activated carbon and limestone (Vol. 22).
- Bagastyo, A. Y., Batstone, D. J., Kristiana, I., Escher, B. I., Joll, C., Radjenovic, J. 2014. Electrochemical treatment of reverse osmosis concentrate on boron-doped electrodes in undivided and divided cell configurations. *Journal of Hazardous Materials*, 279(Supplement C), 111–116.
- Bagastyo, A. Y., Batstone, D. J., Rabaey, K., Radjenovic, J. 2013. Electrochemical oxidation of electrodialysed reverse osmosis concentrate on Ti/Pt–IrO₂, Ti/SnO₂–Sb and boron-doped diamond electrodes. *Water Research*, 47(1), 242–250.

- Bakraouy, H., Souabi, S., Digua, K., Dkhissi, O., Sabar, M., Fadil, M. 2017. Optimization of the treatment of an anaerobic pretreated landfill leachate by a coagulation–flocculation process using experimental design methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 109(Supplement C), 621–630.
- Bashir, M. J. K., Isa, M. H., Kutty, S. R. M., Awang, Z. B., Aziz, H. A., Mohajeri, S., Farooqi, I. H. 2009. Landfill leachate treatment by electrochemical oxidation. *Waste Management*, 29(9), 2534–2541.
- Bonmatí, A., Flotats, X. 2003. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. *Waste Management*, 23(3), 261–272.
- Cabeza, A., Urtiaga, A. M., Ortiz, I. 2007. Electrochemical treatment of landfill leachates using a Boron-Doped Diamond Anode. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(5), 1439–1446.
- Calli, B., Mertoglu, B., Inanc, B. 2005. Landfill leachate management in Istanbul: applications and alternatives. *Chemosphere*, 59(6), 819–829.
- Cecen, F., Gürsoy, G. 2000. Characterization of landfill leachates and studies on heavy metal removal (Vol. 2).
- Cheng, R., Liang, S., Wang, H.-C., D. Beuhler, M. 1994. Enhanced coagulation for Arsenic removal (Vol. 86).
- Chu, Y., Zhang, Q., Xu, D. 2008. Advanced treatment of landfill leachate from a sequencing batch reactor (SBR) by electrochemical oxidation process. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 7(6), 627–633.
- Comninellis, C. 1994. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochimica Acta*, 39(11), 1857–1862.
- Comninellis, C., Kapalka, A., Malato, S., A Parsons, S., Poullos, I., Mantzavinos, D. 2008. Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D (Vol. 83).
- Deborde, M., von Gunten, U. 2008. Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—Kinetics and mechanisms: A critical review. *Water Research*, 42(1), 13–51.

- Deng, Y., Englehardt, J. D. 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Management*, 27(3), 380–388.
- Diamadopoulos, E. 1994. Characterization and treatment of recirculation-stabilized leachate. *Water Research*, 28(12), 2439–2445.
- Drogué, P., Blais, J.-F., Mercier, G. 2007. Review of electrochemical technologies for environmental applications (Vol. 1).
- Farhat, A., Keller, J., Tait, S., Radjenovic, J. 2017. Assessment of the impact of chloride on the formation of chlorinated by-products in the presence and absence of electrochemically activated sulfate. *Chemical Engineering Journal*, 330(Supplement C), 1265–1271.
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Loizidou, M. 1999. A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area. *Environmental Geochemistry and Health*, 21(2), 175–190.
- Fernandes, A., Spranger, P., Fonseca, A. D., Pacheco, M. J., Ciriaco, L., Lopes, A. 2014. Effect of electrochemical treatments on the biodegradability of sanitary landfill leachates. *Applied Catalysis B: Environmental*, 144(Supplement C), 514–520.
- Huda, R. (2017). Pengolahan Lindi dengan Proses Aerobik-Anoksik Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Kargi, F., Pamukoglu, M. Y. 2004. Adsorbent supplemented biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation. *Bioresource Technology*, 94(3), 285–291.
- Kurniawan, T. A., Lo, W., Chan, G. Y. 2006. Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1), 80–100.
- Lema, J. M., Mendez, R., Blazquez, R. 1988. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: A review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 40(3), 223–250.

- Li, X. M., Wang, M., Jiao, Z. K., Chen, Z. Y. 2001. Study on Electrolytic Oxidation for Landfill Leachate Treatment (Vol. 17).
- Li, X. Z., Zhao, Q. L. 2001. Efficiency of biological treatment affected by high strength of ammonium-nitrogen in leachate and chemical precipitation of ammonium-nitrogen as pretreatment. *ICUPCT*, 44(1), 37–43.
- Li, X. Z., Zhao, Q. L., Hao, X. D. 1999. Ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Waste Management*, 19(6), 409–415.
- Lindu, M., Iswanto, B., Senduk, N. 2017. Penentuan koagulan untuk mengolah air lindi bantar gebang menggunakan koagulan poly aluminium chloride, tawas dan polydiallyl dimethyl ammonium chloride. *Jurnal Sains Materi Indonesia; Vol 17, No 1: Oktober 2015*.
- Mandal, P., Dubey, B. K., Gupta, A. K. 2017. Review on landfill leachate treatment by electrochemical oxidation: Drawbacks, challenges and future scope. *Waste Management*, 69(Supplement C), 250–273.
- Martínez-Huitle, C. A., Brillas, E. 2009. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3), 105–145.
- Mussa, Z., Othman, M., Abdullah, P. 2015. Electrochemical oxidation of landfill leachate: investigation of operational parameters and kinetics using graphite-pvc composite electrode as anode (Vol. 26).
- Mussa, Z., Othman, M., Abdullah, P., Nordin, N. 2013. Decolorization of landfill leachate using electrochemical technique (Vol. 11).
- Ozturk, I., Altinbas, M., Koyuncu, I., Arıkan, O., Gomec-Yangın, C. 2003. Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Appropriate Solid Waste Management and Technologies for Developing Countries*, 23(5), 441–446.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah

- Panizza, M., Kapalka, A., Comninellis, C. 2008. Oxidation of organic pollutants on BDD anodes using modulated current electrolysis. *Electrochimica Acta*, 53(5), 2289–2295.
- Panizza, Marco, Delucchi, M., Sirés, I. 2010. Electrochemical process for the treatment of landfill leachate. *Journal of Applied Electrochemistry*, 40(10), 1721–1727.
- Peng, Y. 2017. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(Supplement 2), S2567–S2574.
- Pérez, G., Saiz, J., Ibañez, R., Urtiaga, A. M., Ortiz, I. 2012. Assessment of the formation of inorganic oxidation by-products during the electrocatalytic treatment of ammonium from landfill leachates. *Water Research*, 46(8), 2579–2590.
- Quan, X., Cheng, Z., Chen, B., Zhu, X. 2013. Electrochemical oxidation of recalcitrant organic compounds in biologically treated municipal solid waste leachate in a flow reactor. *Journal of Environmental Sciences*, 25(10), 2023–2030.
- Radjenovic, J., Escher, B. I., Rabaey, K. 2011. Electrochemical degradation of the β -blocker metoprolol by Ti/Ru_{0.7}Ir_{0.3}O₂ and Ti/SnO₂-Sb electrodes. *Water Research*, 45(10), 3205–3214.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. 2008. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- Rezagama, A., Hadiwidodo, M., Purwono, P., Ramadhani, N. F., Yustika, M. 2016. Penyisihan limbah organik air lindi tpa jatibarang menggunakan koagulasi-flokulasi kimia. *Teknik; Vol 37, No 2 (2016): (Desember 2016)DO - 10.14710/Teknik.V37i2.12647*.
- Rodríguez, J., Castrillón, L., Marañón, E., Sastre, H., Fernández, E. 2004. Removal of non-biodegradable organic matter from landfill leachates by adsorption. *Water Research*, 38(14), 3297–3303.
- Särkkä, H., Bhatnagar, A., Sillanpää, M. 2015. Recent developments of electro-oxidation in water treatment — A

- review. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754(Supplement C), 46–56.
- Sururi, M., Ainun, S., & Krisna, A. (2014). *Pengolahan Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon*. 15(1), 20–26, <http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.15.1.20-26>.
- Tatsi, A. A., Zouboulis, A. I., Matis, K. A., Samaras, P. 2003. Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737–744.
- Thomas, D. J. L., Tyrrel, S. F., Smith, R., Farrow, S. 2009. Bioassays for the evaluation of landfill leachate toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 12(1), 83–105.
- Wasis Wildan, M. H., Oktiawan, W., Hadiwidodo, M. 2017. Perencanaan detail engineering design (ded) instalasi pengolahan lindi (ipl) pengembangan tempat pemrosesan akhir (TPA) Sukoharjo Kabupaten Pati. *Jurnal Teknik Lingkungan; Vol 6, No 3 (2017): Jurnal Teknik Lingkungan*.
- Yavuz, Y., Shahbazi, R. 2012. Anodic oxidation of Reactive Black 5 dye using boron doped diamond anodes in a bipolar trickle tower reactor. *Separation and Purification Technology*, 85(Supplement C), 130–136.
- Zhao, G., Pang, Y., Liu, L., Gao, J., Lv, B. 2010. Highly efficient and energy-saving sectional treatment of landfill leachate with a synergistic system of biochemical treatment and electrochemical oxidation on a boron-doped diamond electrode (Vol. 179).
- Zhou, B., Yu, Z., Wei, Q., Long, H., Xie, Y., Wang, Y. 2016a. Electrochemical oxidation of biological pretreated and membrane separated landfill leachate concentrates on boron doped diamond anode. *Applied Surface Science*, 377(Supplement C), 406–415.
- Zhou, B., Yu, Z., Wei, Q., Long, H., Xie, Y., Wang, Y. 2016b. Electrochemical oxidation of biological pretreated and membrane separated landfill leachate concentrates on boron doped diamond anode. *Applied Surface Science*, 377(Supplement C), 406–415.

Zouboulis, A. I., Xiao-Li Chai, Katsoyiannis, I. A. 2004. The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates. *Journal of Environmental Management*, 70(1), 35–41.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN KEKUATAN IONIK

Kekuatan ionik (μ) merupakan perhitungan konsentrasi ion total di dalam larutan. Ion dengan muatan yang lebih besar dapat menyebabkan rekasi elektrostatik yang lebih besar. Rumus kekuatan ion adalah sebagai berikut.

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i c_i z_i^2$$

Dimana:

μ = kekuatan ionik (M)

c_i = konsentrasi ion (M)

z_i = jumlah muatan ion

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B

PROSEDUR ANALISIS

B.1 Pengukuran pH

Prinsip Kerja:

Potensiometri adalah cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL.
2. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya menggunakan *tissue*.
3. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan silinder pH meter ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan pH hingga stabil dan muncul tulisan *ready*, kemudian mencatat pH yang muncul pada layar pH meter.

(SNI 06-6989.11-2004)

B.1 Pengukuran TDS

Prinsip Kerja:

Potensiometri adalah cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur Analisis:

1. Menyiapkan sampel sebanyak 10 mL.
2. Membilas batang silinder pH ion lab dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya menggunakan *tissue*.
3. Menyalakan pH ion lab, mengatur mode pada pengukuran TDS lalu mencelupkan silinder pH ion lab ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan TDS stabil hingga muncul tulisan \sqrt{AUTO} , lalu mencatat angka TDS yang muncul pada layar pH ion lab.

(SNI 06-6989.1-2004)

B.3 Analisis Klorida (Cl⁻) dengan Metode Argentometri (Mohr)

Prinsip Kerja:

Senyawa klorida dalam contoh uji air dapat dititrasi dengan larutan perak nitrat dalam suasana netral atau sedikit basa (pH 7 sampai dengan pH 10), menggunakan larutan indikator kalium kromat. Perak klorida diendapkan secara kuantitatif sebelum terjadinya titik akhir titrasi, yang ditandai dengan mulai terbentuknya endapan perak kromat yang berwarna merah kecoklatan.

Reagen yang dibutuhkan:

1. Larutan Perak Nitrat (AgNO₃) 0,0141 N
Melarutkan 2,39725 g AgNO₃ dalam labu pengencer berisi 1 L larutan *aquadest*.
2. Larutan Kalium Dikromat 5%
3. Standarisasi untuk faktor koreksi AgNO₃
 - Melarutkan 1,6485 g NaCl dengan larutan *aquadest* dalam labu ukur sampai tanda batas.
 - Mengambil 10 mL larutan NaCl dengan pipet volumetrik ke dalam *beaker glass*.
 - Menambah 3 tetes HNO₃ pekat, 3 tetes K₂Cr₂O₄ 10% dan 1 sendok spatula ZnO.
 - Menitrasinya dengan larutan AgNO₃ 0,0141 N hingga warna kuning berubah menjadi merah bata.

Prosedur Analisis

1. Mengambil sampel sebanyak 12,5 mL ke dalam labu erlenmeyer berukuran 100 mL.
2. Menambahkan 0,5 mL K₂Cr₂O₄.
3. Menambahkan 1 sendok spatula bubuk ZnO.
4. Menitrasi dengan AgNO₃ hingga berubah warna menjadi merah bata.
5. Menghitung nilai dengan persamaan berikut:

$$\text{Kadar Cl}^{-} (\text{mg/L}) = \frac{(A - B) \times N \times 35,45 \times 1000}{V}$$

Dimana:

- A : volume larutan baku AgNO_3 untuk titrasi contoh uji (mL)
B : volume larutan baku AgNO_3 untuk titrasi blanko (mL)
N : normalitas larutan baku AgNO_3 (mgrek/mL)
V : volume contoh uji (mL)

(SNI 06-6989.19-2004)

B.3 Analisis COD dengan Metode *Closed Reflux and Colorimetric*

Prinsip Kerja:

Ketika sampel dipanaskan, ion dikromat akan mengoksidasi COD pada sampel. Hal ini menyebabkan perubahan Cr (VI) menjadi Cr (III).

Alat:

a. ***Vial* atau Tabung COD**

Setiap akan digunakan, *vial* harus dalam keadaan bersih. Cara membersihkan *vial* adalah dengan cara dibilas dan dikocok dengan air kran 1 kali, kemudian dengan aquadest 2 kali, lalu dikeringkan.

b. ***Digester***

Digester dioperasikan pada suhu 148°C selama 2 jam.

c. ***Spektroquant***

Spektroquant digunakan untuk mengukur absorbansi larutan yang telah didigest pada panjang gelombang 500 nm.

Bahan:

- a. ***Digestion solution***, larutkan 10,216 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (yang sebelumnya telah dikeringkan pada suhu 150°C selama 2 jam) ke dalam 500 mL aquadest, tambahkan 167 mL H_2SO_4 pekat,

dan tambahkan 33,3 gr HgSO_4 , dinginkan lalu diencerkan hingga volume 1000 mL.

- b. **Sulfuric acid reagent**, tambahkan Ag_2SO_4 ke dalam H_2SO_4 pekat dengan komposisi 5,5 gr $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{Kg H}_2\text{SO}_4$. Diamkan 1 hingga 2 hari hingga terlarut.
- c. **Larutan standar Potassium hydrogen phthalate (KHP)**, larutkan 425 mg KHP ke dalam 500 mL aquadest. Larutan ini memiliki nilai COD 1000 mg O_2/L .

Pembuatan kurva kalibrasi:

- a. Buat larutan dengan konsentrasi COD 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 dan 400 mg O_2/L dari larutan standart KHP 1000 mg O_2/L .
- b. Siapkan *vial* yang telah dibersihkan
- c. Tambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
- d. Tambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan $\text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$) ke dalam *vial*.
- e. Tambahkan 1 mL larutan standar KHP, tutup *vial* dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
- f. Hidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga 148°C .
- g. Masukkan *vial* ke dalam *digester*. Lalu tekan tombol run/enter.
- h. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian kocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
- i. Hidupkan spectroquant, lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023.
- j. Baca absorbansi COD pada spectroquant. Cari panjang gelombang optimum untuk setiap variasi konsentrasi COD yang telah dibuat, lalu buat kurva kalibrasi.

Prosedur analisis:

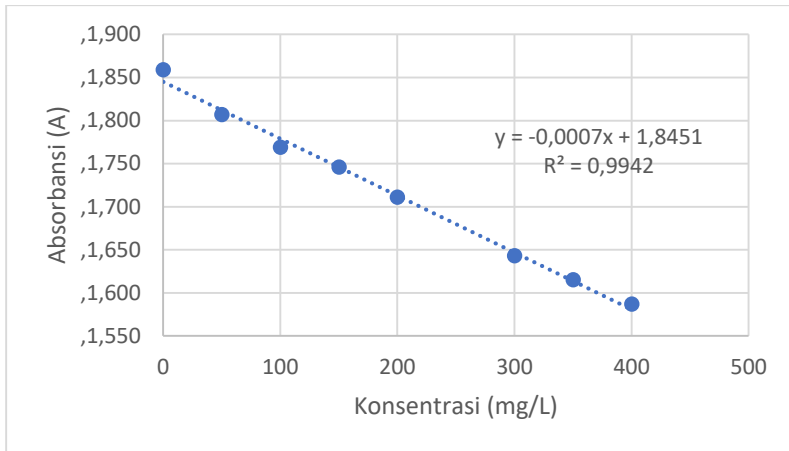
- a. Siapkan *vial* yang telah dibersihkan

- b. Tambahkan 1,5 mL *digestion solution* (larutan dikromat) ke dalam *vial*.
- c. Tambahkan 2,5 mL *sulphuric acid reagent* (larutan $\text{Ag}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$) ke dalam *vial*.
- d. Tambahkan 1 mL sampel, tutup dengan rapat lalu dikocok hingga homogen. Setelah dikocok, pastikan tutup *vial* tetap dalam keadaan rapat.
- e. Hidupkan *digester*, kemudian atur suhunya hingga 148°C.
- f. Masukkan *vial* ke dalam *digester*, lalu tekan tombol run/enter.
- g. Setelah 2 jam, turunkan suhu *digester* dan tunggu hingga 15-20 menit. Lalu angkat *vial* dari *digester*, kemudian dikocok hingga homogen, lalu diamkan hingga suhunya turun seperti suhu ruang, dan seluruh suspensi dalam larutan telah mengendap.
- h. Hidupkan spectroquant, lalu atur metode untuk mengukur COD dengan memasukkan angka 023. Baca pada spektroquant dengan panjang optimum yang telah didapatkan.
- i. Masukkan hasil pembacaan absorbansi ke dalam persamaan regresi untuk mendapatkan konsentrasi COD.

Kurva Kalibrasi COD

Tabel 1. Hasil pembacaan absorbansi COD

Blanko	1,860
50	1,807
100	1,769
150	1,746
200	1,711
300	1,643
350	1,615
400	1,587



Grafik B1. Kurva Kalibrasi COD

(APHA;2012)

B.4 Analisis SO_4^{2-} dengan Metode Turbidimetri

Prinsip

Metode ini digunakan untuk penentuan sulfat, SO_4^{2-} dalam air dan air limbah secara turbidimetri pada kisaran 1 mg/L sampai dengan 40 mg/L.

Ruang Lingkup

Ion sulfat bereaksi dengan barium klorida dalam suasana asam akan membentuk suspensi barium sulfat dengan membentuk kristal barium sulfat yang sama besarnya diukur dengan spektrofotometer.

Bahan

1. Air suling bebas sulfat
2. Barium klorida, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. Natrium sulfat anhidrat, Na_2SO_4

4. Larutan *salt acid*

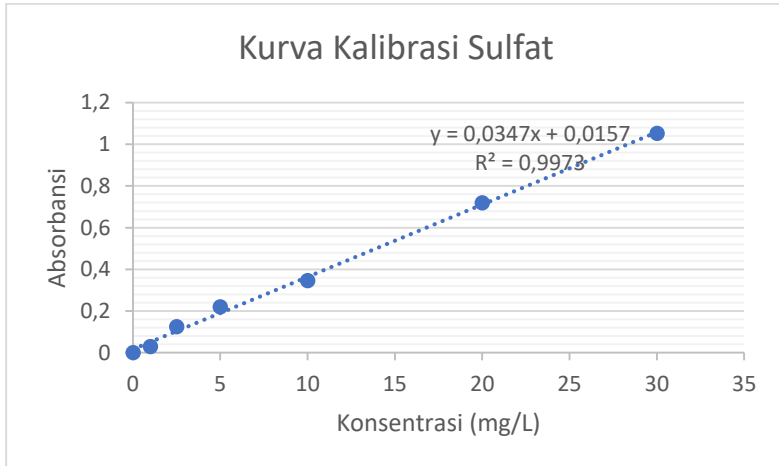
Pembuatan Kurva Kalibrasi:

- a. Pembuatan larutan induk SO_4^{2-} 100 mg/L
Mengeringkan Natrium sulfat anhidrat, Na_2SO_4 di oven pada suhu 105°C selama 24 jam, lalu mendinginkan dalam desikator. Kemudian melarutkan 1,479 g Na_2SO_4 ke dalam 1000 mL aquadest.
- b. Mengencerkan larutan induk sulfat menjadi larutan dengan konsentrasi 1 hingga 20 mg/L
- c. Memindahkan masing-masing 10 mL larutan induk yang telah diencerkan ke dalam labu erlenmeyer. Kemudian mengisi satu lagi labu erlenmeyer dengan aquadest sebanyak 10 mL sebagai blanko.
- d. Menambahkan 0,5 mL larutan salt acid ke dalam masing-masing labu erlenmeyer, lalu mengocok hingga homogen, kemudian menambahkan 1 spatula BaCl_2 ke dalam masing-masing labu erlenmeyer dan dikocok hingga homogen, kemudian didiamkan selama 10 menit.
- e. Membaca absorbansi larutan spektrofotometer dengan panjang gelombang 420 nm, kemudian membuat grafik regresi dari hasil yang telah didapatkan.

Prosedur Penelitian

- Mengisi 2 buah labu erlenmeyer dan mengisinya masing-masing dengan 10 mL sampel
- Menambahkan 2 mL larutan salt acid ke dalam masing-masing Erlenmeyer sambil diaduk hingga homogen
- Menambahkan 1 spatula BaCl_2 pada salah satu erlemeyer, kemudian dikocok hingga homogeny, lalu didiamkan selama 10 menit.

- Membaca absorbansi larutan yang telah ditambahkan BaCl_2 pada spektrofotometer dengan blanko adalah sampel yang diberi salt acid tanpa diberi BaCl_2 .



Grafik B2. Kurva Kalibrasi Sulfat

(APHA;2012)

B.4 Analisis Total Klorin dengan Metode DPD

Prinsip

Total klorin yang terdapat pada sampel akan berikatan dengan DPD membentuk warna merah muda keunguan.

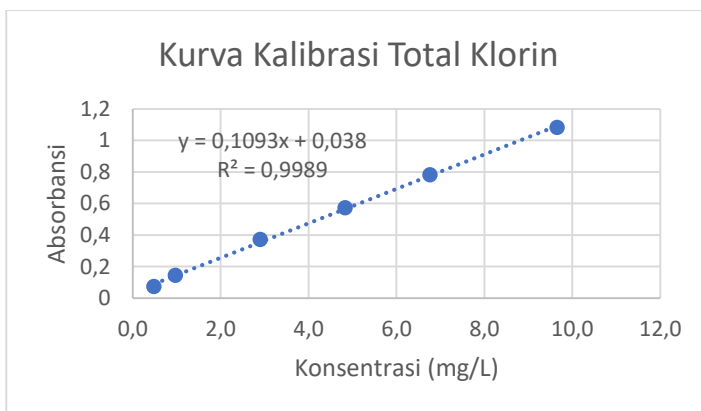
Pembuatan kurva Kalibrasi

1. Menyiapkan larutan induk NaOCl 12%
2. Mengencerkan larutan induk NaOCl menjadi larutan dengan konsentrasi 0,5; 1; 3; 5; 7 dan 10 mg L^{-1} NaOCl menggunakan aquadest.
3. Menuangkan serbuk DPD untuk 5 mL sampel ke dalam vial

4. Menuangkan masing-masing larutan ke dalam vial yang telah berisi serbuk DPD
5. Mencari panjang gelombang optimum, kemudian membaca absorbansi larutan pada spektrofotometer dengan panjang gelombang optimum yang telah didapatkan.

Prosedur Analisis

1. Menuangkan seluruh serbuk DPD dalam 1 kemasan ke dalam satu vial.
2. Menuangkan masing-masing 5 mL sampel ke dalam vial yang berisi DPD sebagai sampel dan tidak berisi DPD sebagai blanko.
3. Membaca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 510 nm dengan blanko adalah sampel 5 mL yang tidak diberi DPD.
4. Memasukkan panjang gelombang yang didapat ke dalam persamaan kurva kalibrasi.



Grafik B3. Kurva Kalibrasi Total Klorin

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C DATA HASIL ANALISIS

Tabel LC. 1 Penyisihan Massa COD Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	50 mA cm ⁻²		75 mA cm ⁻²		100 mA cm ⁻²	
	COD (g)	[COD/ COD ₀]	COD (g)	[COD/ COD ₀]	COD (g)	[COD/ COD ₀]
0	1.593	1	1.427	1	1.427	1
2	1.377	0.864	1.410	0.988	1.610	1.129
4	1.290	0.810	1.159	0.812	0.977	0.685
6	1.166	0.732	0.899	0.630	0.705	0.494

Tabel LC. 2 Penyisihan Warna Asli Lindi

Waktu (jam)	Warna (Absorbansi)		
	50 mA cm ⁻²	75 mA cm ⁻²	100 mA cm ⁻²
0	1.846	1.837	1.826
2	1.818	1.808	1.744
4	1.778	1.673	1.521
6	1.680	1.449	1.172

Tabel LC. 3 pH dan TDS pada Penelitian Pendahuluan

Waktu (jam)	50 mA cm ⁻²		75 mA cm ⁻²		100 mA cm ⁻²	
	pH	TDS (g)	pH	TDS (g)	pH	TDS (g)
0	8.480	5.315	8.410	5.13	8.560	4.935
2	8.200	5.135	8.280	5.02	8.250	4.935
4	8.090	4.861	8.070	4.891	8.050	4.900
6	8.040	4.835	7.980	4.860	7.960	4.777

Tabel LC. 4 Massa TDS pada Variasi Penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah/L)	Massa TDS		
	pH 3	pH 5	pH Asli Lindi
0.00	7.785	8.23	10.2
0.60	7.85	8.25	10.2
1.22	7.67	7.97	9.56
1.88	7.51	7.80	9.58
3.19	7.34	7.59	9.00
4.57	7.26	7.50	8.80

Tabel LC. 5 Penyisihan Massa COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal proses= pH 3 dengan penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.763	1	0
0.60	1.613	0.915	0
1.22	0.903	0.512	35.1858
1.88	0.804	0.456	20.89
3.19	0.741	0.420	40.18
4.57	0.571	0.324	51.9

Tabel LC. 6 Penyisihan Massa COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal proses= pH 5 dengan penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0,00	1,713	1	0
0,60	1,630	0,95	0
1,22	1,581	0,92	0
1,88	1,465	0,85	28,642
3,19	1,360	0,79	60,637
4,57	1,132	0,66	122,303

Tabel LC. 7 Penyisihan Massa COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal proses= pH 8 dengan penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0,00	1,763	1	0
0,60	1,59	0,90	17,95
1,22	1,79	1,01	54,92
1,88	1,58	0,89	96,94
3,19	1,15	0,65	159,25
4,57	1,28	0,73	186,08

Tabel LC. 8 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH 3 dengan Penambahan 0,05M NaCl

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.00	0.390	1	3.199008	1	3.01
0.60	0.384	0.983			3.07
1.22	0.343	0.877			3
1.88	0.333	0.854	2.879	0.9	2.89
3.19	0.249	0.638			2.55
4.57	0.214	0.549	2.575	0.805	2.4

Tabel LC. 9 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH 5 dengan Penambahan 0,05M NaCl

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.00	0.582	1	3.199	1	5
0.60	0.541	0.929			5.4
1.22	0.528	0.908			5.1
1.88	0.495	0.849	2.975	0.93	4.3
3.19	0.420	0.721			3.5
4.57	0.361	0.620	2.575	0.805	2.5

Tabel LC. 10 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH 5 dengan Penambahan 0,05 M NaCl

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.000	0.581	1	3.549	1	8.56
0.600	0.573	0.986			8.60
1.224	0.478	0.823			8.52
1.875	0.392	0.675	3.225	0.909	8.29
3.191	0.363	0.624			8.02
4.565	0.336	0.579	2.897	0.816	7.75

Tabel LC. 11 Massa TDS pada Variasi Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	Massa TDS		
	pH 3	pH 5	pH Asli Lindi
0.00	9	9.08	10.65
0.60	8.84	8.94	10.6
1.22	8.85	8.95	10.486
1.88	8.60	8.92	10.08
3.19	8.48	8.96	9.494
4.57	8.15	9.05	9.384

Tabel LC. 12 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal 3 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.705	1	0
0.60	1.522	0.892	0.000
1.22	1.385	0.812	1.051
1.88	0.853	0.500	20.737
3.19	0.792	0.464	42.819
4.57	0.695	0.407	50.512

Tabel LC. 13 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal 5 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.63	1.00	0.00
0.60	1.25	0.77	0.03
1.22	1.08	0.67	0.03
1.88	0.96	0.59	0.03
3.19	0.70	0.43	5.30
4.57	0.73	0.45	24.88

Tabel LC. 14 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH Asli Lindi dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.755	1.000	0.000
0.60	1.659	0.945	0.000
1.22	1.479	0.843	3.286
1.88	1.265	0.721	7.380
3.19	0.976	0.556	31.240
4.57	1.017	0.579	50.092

Tabel LC. 15 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH 3 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.00	0.494	1	1.500	1	3.06
0.60	0.495	1.002			3.36
1.22	0.402	0.814			3.35
1.88	0.350	0.708	1.152	0.768	3.30
3.19	0.295	0.597			3.24
4.57	0.300	0.606	1.012	0.675	3.21

Tabel LC. 16 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH 5 dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.00	0.432	1	1.250	1	5.07
0.60	0.477	1.10			5.77
1.22	0.466	1.08			5.93
1.88	0.399	0.92	1.104	0.883	6.06
3.19	0.358	0.83			5.31
4.57	0.342	0.79	0.506	0.405	4.77

Tabel LC. 17 Penyisihan Massa Ammonium dan Klorida pada pH awal proses=pH Asli dengan Penambahan 0,05 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ₀]	
0.00	0.423	1	1.450	1	8.87
0.60	0.385	0.910			8.78
1.22	0.345	0.816			8.72
1.88	0.353	0.834	1.200	0.828	8.70
3.19	0.329	0.778			8.50
4.57	0.301	0.712	1.058	0.730	8.10

Tabel LC. 18 Massa TDS Variasi Penambahan 0,025 M+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	Massa TDS (g)		
	pH 3	pH 5	pH Asli Lindi
0,00	7,78	8,87	10,65
0,60	8,01	8,78	10,6
1,22	8,05	8,72	10,486
1,88	8,24	8,7	10,08
3,19	7,80	8,5	9,494
4,57	7,75	8,1	9,384

Tabel LC. 19 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal 5 dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0,00	1,438333	1	0
0,60	1,06	0,73	0,00
1,22	1,32	0,92	0,83
1,88	1,00	0,69	4,97
3,19	0,71	0,49	58,04
4,57	0,71	0,49	103,40

Tabel LC. 20 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal 5 dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.555	1	0
0.60	1.23	0.79	4.00
1.22	1.06	0.68	4.28
1.88	1.04	0.67	14.39
3.19	0.85	0.55	42.82
4.57	0.76	0.49	80.31

Tabel LC. 21 Penyisihan COD dan Pembentukan Total Klorin pada pH awal= pH asli lindi dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	COD		Total Klorin (mg)
	COD (g)	[COD/COD ₀]	
0.00	1.638	1	0
0.60	1.45	0.88	3.32
1.22	1.24	0.76	30.78
1.88	1.25	0.76	49.20
3.19	1.04	0.63	97.28
4.57	0.91	0.55	164.67

Tabel LC. 22 Penyisihan Ammonium dan Klorida pada pH awal 5 dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ⁻ o]	
0,00	0,343853	1	2,549	1	3,04
0,60	0,249909	0,72679			2,69
1,22	0,255637	0,743448			2,55
1,88	0,200511	0,58313	2,351	0,922	2,49
3,19	0,188617	0,548541			2,49
4,57	0,142649	0,414854	2,023	0,794	2,46

Tabel LC. 23 Penyisihan Ammonium dan Klorida pada pH awal 5 dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ⁻ o]	
0.00	0.402043	1	2.249	1	4.99
0.60	0.38672	0.961887			5.76
1.22	0.355389	0.883956			5.88
1.88	0.325721	0.810163	2.015	0.896	5.59
3.19	0.317563	0.789873			4.15
4.57	0.314163	0.781416	1.628	0.724	3.53

Tabel LC. 24 Penyisihan Ammonium dan Klorida pada pH awal= pH asli lindi dengan Penambahan 0,025M NaCl+0,025 M Na₂SO₄

Energi (Ah/L)	NH ₄ ⁺		Klorida (g)		pH
	NH ₄ ⁺ (g)	[NH ₄ ⁺ /NH ₄ ⁺]	Cl ⁻ (g)	[Cl ⁻ /Cl ⁻ o]	
0.00	0.45	1.00	2.499	1	8.87
0.60	0.39	0.87			8.78
1.22	0.31	0.70			8.72
1.88	0.37	0.82	2.159	0.864	8.70
3.19	0.34	0.76			8.50
4.57	0.23	0.52	1.931	0.773	8.10



Kementerian
Perindustrian
REPUBLIK INDONESIA

**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemendiperin.go.id/>



LAPORAN HASIL UJI
No. 3029-3043/18/LHU/2/V/2018

UMUM/GENERAL

No. Analisa <i>Analisa number</i>	: P. 3029 – P. 3043
Contoh <i>Sample</i>	: Air Lindi
Kode / Mark <i>Code / Brand</i>	: Terlampir
Nama Pengirim <i>Sender's Name</i>	: PATMAWATI AGUSTINA
Alamat <i>Address</i>	: Jl. Gebang Kidul No. 42 Surabaya
Jenis Usaha <i>Type of business</i>	: -
Petugas Pengambil Contoh <i>Sampling Officer</i>	: -
Instansi <i>Institute</i>	: -
Tanggal/Waktu Pengambilan Contoh <i>Date/time of sampling</i>	: -
Tanggal/Waktu Diterima Laboratorium <i>Date/time acceptance by laboratory</i>	: 30 April 2018 / Jam: 16.05 WIB
Lokasi Pengambilan Contoh <i>Location of sampling</i>	: -
Acuan Metode Sampling <i>Sampling method</i>	: -

DATA INDUSTRI/INDUSTRIAL DATA

Debit Limbah <i>Discharge of waste</i>	: -
Jumlah Produksi <i>Number of production</i>	: -
Penggunaan bahan baku rata-rata selama bulan pemantauan <i>Average usage of raw materials during the monitoring month</i>	: -

KEADAAN SAMPEL/SAMPLE CONDITION

pH contoh pada saat pengambilan <i>pH on sampling time</i>	: -
Suhu contoh pada saat pengambilan <i>Temperature on sampling time</i>	: -



LAPORAN HASIL UJI

No. 3029-3043/18/LHU/2/V/2018

Nomor Analisa : 2018P3029 s/d 2018P3043
Contoh : Air Lindi
Merk : Terlampir
Diterima Tanggal : 30 April 2018
Catatan Sampel : 250ml air limbah dalam botol

Nama Pengirim : FATMAWATI AGUSTINA

Alamat : Jl. Gebang Kidul No. 42 Surabaya

Nomor Analisa	Kode	Hasil Uji TOC	Satuan	Metode Uji
P. 3029	NaCl pH 3 (t7)	11.06	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3030	NaCl pH 5 (t0)	15.45	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3031	NaCl pH 5 (t7)	12.01	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3032	NaCl pH asli (t0)	15.8	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3033	NaCl pH asli (t7)	13.24	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3034	SO ₄ ²⁻ pH 3 (t0)	22.33	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3035	SO ₄ ²⁻ pH 3 (t7)	38.325	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3036	SO ₄ ²⁻ pH 5 (t0)	60.9	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3037	SO ₄ ²⁻ pH 5 (t7)	44.81	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3038	SO ₄ ²⁻ pH asli (t0)	29.02	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3039	SO ₄ ²⁻ pH asli (t7)	51.68	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3040	Campuran pH 5 (t0)	61.74	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3041	Campuran pH 5 (t7)	45.42	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3042	Campuran pH asli (t0)	68.64	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3043	Campuran pH asli (t7)	50.31	mg/L	SNI 06-6989.28-2005

Catatan :

- Parameter di uji sesuai dengan permintaan
- Tanda "<" menunjukkan nilai Limit Of Quantity dari pengujian



**BADAN PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN INDUSTRI
BALAI RISET DAN STANDARDISASI INDUSTRI SURABAYA
LABORATORIUM PENGUJIAN DAN KALIBRASI
BARISTAND INDUSTRI SURABAYA**

Jl. Jagir Wonokromo No. 360 Surabaya (60244), Telp. (031) 8410054, Fax. (031) 8410480
<http://baristandsurabaya.kemendikperin.go.id/>



LAPORAN HASIL UJI

No. 3454-3462/18/LHU/2/M/2018

Nomor Analisa : 2018P3454 s/d 2018P3462

Nama Pengirim : FATMAWATI AGUSTINA

Contoh : Air Limbah dan Air Lindi

Alamat : Jl. Gebang Kidul No. 42 Surabaya

Merk : Terlampir

Diterima Tanggal : 15 Mei 2018

Catatan Sampel : 250ml air limbah dalam botol

Nomor Analisa	Kode Sampel Air Limbah	Hasil Uji TOC	Satuan	Metode Uji
P. 3454	No. 1	5,047	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3455	No. 2	6,292	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3456	No. 3	9,125	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3457	No. 4	9,374	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3458	No. 5	6,400	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3459	No. 6	7,494	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3460	No. 7	9,869	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3461	No. 8	12,81	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3462	No. 9	13,32	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3463	No. 10	11,84	mg/L	SNI 06-6989.28-2005

Nomor Analisa	Kode Sampel Air Lindi	Hasil Uji TOC	Satuan	Metode Uji
P. 3464	Campuran pH 3 (t0)	54,87	mg/L	SNI 06-6989.28-2005
P. 3465	Campuran pH 3 (t7)	390,2	mg/L	SNI 06-6989.28-2005

Catatan :
Parameter di uji sesuai dengan permintaan

Surabaya, 23 Mei 2018
Kepala Laboratorium
Kecelakaan Lingkungan

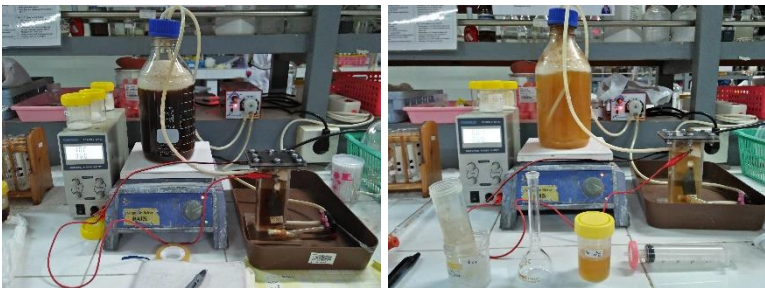


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran D DOKUMENTASI PENELITIAN



Gambar LD. 1 Pengambilan dan Penyaringan Sampel



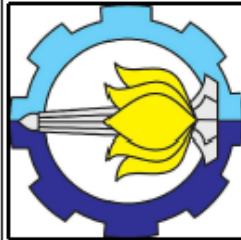
Gambar LD. 2 Operasi Reaktor Elektrokimia



Gambar LD. 3 Sampel Sebelum dan Setelah Pengolahan



Gambar LD. 4 Analisis Parameter



JURUSAN

TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

LEGENDA

DRAFTER

FATMAWATI AGUSTINA
03211440000086

DOSEN PEMBIMBING

Arseto Yekti Bagastyo,
S.T.,M.T.,M.Phil.,Ph.D.

JUDUL GAMBAR

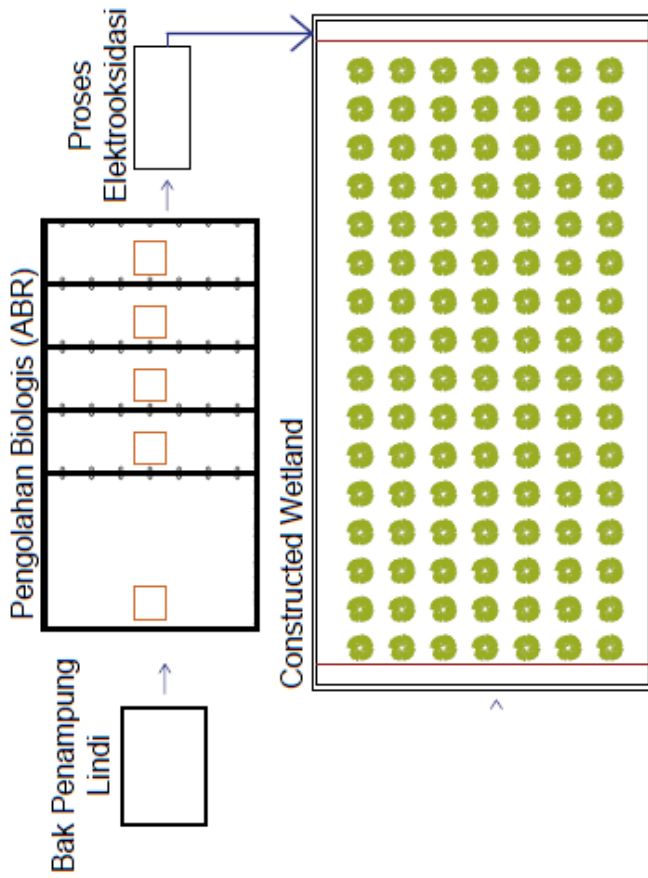
Diagram Alir Proses Pengolahan Lindi

SKALA

HALAMAN

TTD

MARK





BIOGRAFI PENULIS

Fatmawati Agustina dilahirkan di Paser, 8 Agustus 1996. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 021 Long Kali pada Tahun 2002-2008. Kemudian dilanjutkan di SMP N 2 Long Kali pada Tahun 2008-2011, sedangkan pendidikan tingkat atas ditempuh di SMA N 1 Tanah Grogot pada Tahun 2011-2014. Pada Tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan (FTSLK) Institut Teknologi

Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan terdaftar dengan NRP 03211440000086.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif sebagai pengurus Komunitas Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) HMTL FTSLK ITS dan Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia (IMTLI) Regional IV. Penulis juga pernah menjadi asisten Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan pada Tahun 2018. Pada Tahun 2017, penulis mengikuti kerja praktik mengenai “Studi Pengelolaan Limbah B3” di PT. Pertamina RU V Balikpapan. Penulis juga pernah mengikuti program magang mengenai pengelolaan limbah padat dan limbah B3 di Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Paser. Apabila ingin mengetahui lebih dalam mengenai penelitian ini, dapat dihubungi via email fatmawagustina8@gmail.com.



KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Genap 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-02

Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Kamis 03-Mei-18

Nilai TOEFL 433

Pukul : 10.00-11.00 WIB

Lokasi : TL-101

Judul : PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI MENGGUNAKAN ANODA BORON-DOPED DIAMOND (BDD) DENGAN PENAMBAHAN ION KLOIDA DAN SULFAT

Nama : Fatmawati Agustina

Tanda Tangan

NRP. : 03211440000086

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Kemajuan Tugas Akhir
1.	BOD ₅ ? atau TOC ?
2.	Penulisan titik desimal/koma
3.	Pengisian $\rightarrow \Delta$ atau Penjumlahan \rightarrow massa COD. \rightarrow %R
4.	Pembatasan debit lindi di Ngipik \rightarrow -
5.	Intensitas warna \rightarrow ✓
6.	Massa atau volume ?
7.	ICE \rightarrow untuk menjawab proses oksidasi mana dulu.
8.	Aplikasi \rightarrow TDS spk apa di effluen. krn. ditambahkan ion?

Ab.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir
2. Tidak dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir

Dosen Pembimbing

Arseto Yekti Bagastyo S.T.,M.T.,M.Phil.,Ph.D



UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Genap 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 03 Juli 2018

Nilai TOEFL 483

Pukul : 10.00 - 12.00 WIB

Lokasi : TL-104

Judul : PROSES OKSIDASI ELEKTROKIMIA PADA LINDI MENGGUNAKAN ANODA BORON-DOPED DIAMOND DENGAN PENAMBAHAN ION KLORIDA DAN SULFAT

Nama : FATMAWATI AGUSTINA

NRP. : 03211440000086

Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1	Penambahan elektrolit NaCl & $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow$ konsentrasi alasannya?
2	Diagram alir / skema aplikasi pengolahan lindi dgn. elektro-oksidasi
3	Penjelasan dengan anoda BDD
4	Penjelasan kinetika reaksi \rightarrow rasio elektrolit vs organik
5	Aplikasi post-treatment \rightarrow penjelasan
6	Hukum Faraday, $I \rightarrow m \Rightarrow ICE ???$
7	Kontribusi chlorine species pada oksidasi di masng ² pH.

23/7
Ab

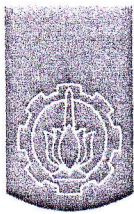
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D



FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Nama : Fatmawati Agustina
NRP : 03211440000086
Judul Tugas Akhir : Proses oksidasi Elektrokimia pada Lindi menggunakan Anoda Boron-Doped Diamond (BDD) dengan Penambahan Ion Klorida dan Sulfat

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Alasan penambahan konsentrasi elektrolit NaCl & Na ₂ SO ₄	Ditambah pembahasan mengenai rasio $Cl^-:SO_4^{2-}$
2.	Diagram alir skema aplikasi pengolahan lindi dengan elektrooksidasi	Telah ditambahkan (hal. 105, Lampiran D)
3.	Penjelasan dengan Anoda BDD	Telah ditambah dan diperbaiki pembahasan mengenai Anoda BDD
4.	Penjelasan kinetika reaksi degradasi	Telah dijelaskan pada sub.bab 2.4
5.	Aplikasi post treatment	Lampiran D
6.	Hukum Faraday \rightarrow ICE	Hal. 80
7.	Kontribusi species klorin pada distribusi masing-masing jenis pH	Hal. 25

Dosen Pembimbing,

Arseto Yelhi Bagastya, S.T., M.T., M. Phil., Ph.D

Mahasiswa Ybs.,

Fatmawati Agustina

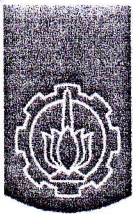


KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Fatmawati Agustina
NRP : 03211440000086
Judul Tugas Akhir : Proses Oksidasi Elektrokimia pada Lindi menggunakan Anoda Boron-Doped Diamond (BDD) dengan penambahan ion klorida dan sulfat





No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	20/02/2018	- Pembahasan Timeline penelitian - Parameter yang diuji pada penelitian pendahuluan adalah pH, TDS dan Intensitas warna - Melakukan pengujian karakteristik untuk sampel yg diawetkan dan sampel yang tidak diawetkan	Ab
2.	7/03/2018	Evaluasi pembuatan kurva kalibrasi COD - Tahapan menguji sampel yaitu: menuangkan $K_2Cr_2O_7$, lalu larutan Ag_2SO_4 , setelah itu memasukkan sampel - Sebelum di digest dan setelah di digest sampel harus di homogenkan.	Ab
3.	15/03/2018	- Nilai COD yang didapatkan dari penelitian pendahuluan fluktuatif. - Pada sampel terdapat suspensi sehingga perlu disaring terlebih dahulu menggunakan syringe filter 0,45 μm .	Ab
4.	16/03/2018	- Nilai COD masih fluktuatif - Apabila syringe filter terasa berat, harus diganti dengan yang baru - Untuk mengevaluasi menggunakan filter atau tidak, yang difilter sebelum dianalisis adalah pada t ₀ dan t ₇ .	Ab

Surabaya,
Dosen Pembimbing



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama :
NRP :
Judul Tugas Akhir :

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
5.	20/03/2018	- Menyiapkan abstract untuk mendaftar International conference di Thailand. - Deadline abstrak tanggal 31 Maret 2018 - Hasil yang dimasukkan ke dalam abstrak adalah hasil dari penelitian pendahuluan	
6.	2/04/2018	- kerapatan arus yang digunakan untuk penelitian utama adalah 75 mA cm^{-2} - Keluatan lonik yang ditambahkan adalah 0,05M - waktu operasi proses selama 7 jam.	
7.	9/04/2018	- Menunjukkan hasil penelitian variasi pH 3 dan pH 5 dengan penambahan 0,05M NaCl - Perlu melakukan analisis ulang parameter klorida dan total klorin - Lanjut variasi running untuk variasi berikutnya	
8.	11/04/2018	- Menunjukkan hasil running variasi AA, AB, AC, BA, BC - Outline Laporan TA o) Pengaruh pH terhadap proses elektroklorinasi + 0,05M NaCl o) pengaruh pH terhadap proses elektroklorinasi + 0,05M Na_2SO_4 o) Pengaruh pH terhadap proses elektroklorinasi dengan penambahan 0,025M NaCl + 0,025M Na_2SO_4 o) Konversi senyawa organik o) Konsumsi energi spesifik	

Surabaya,
Dosen Pembimbing



KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama :
NRP :
Judul Tugas Akhir :

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
9.	20/04/2018	- Redaksional dalam penelitian penulisan TA masih banyak yang perlu diperbaiki - setelah melampirkan tabel atau grafik, harus melakukan pembahasan terhadap data yg dilampirkan	Ab
10.	29/04/2018	- Lakukan perhitungan ICE untuk COD & total klorin - menganalisis hubungan antar parameter	Ab
11	2/05/2018	- Asistensi PPT seminar progress - Metode yang disampaikan hanya isinya saja. +	Ab
12.	22/05/2018	- Buat pembahasan scale up metode untuk aplikasi skala besar, lakukan analisis biaya juga.	Ab
13.	6/06/2018	- Tanda koma dan titik untuk desimal harus konsisten - Alasan gmn harus mengambil dari referensi apabila tidak dilakukan analisis. - Cari jurnal yang menganalisis finansial - Dalam kesimpulan tidak boleh ada pembahasan	Ab

Surabaya, 8 Juni 2018.....
Dosen Pembimbing